Российская Академия Наук

ИПФ РАН

УНИВЕРСИТЕТ ЛОБАЧЕВСКОГО

ВСЕРОССИЙСКАЯ IV АКУСТИЧЕСКАЯ 2026

РОССИЙСКОЕ АКУСТИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО РАО

МЦФПИН

АКИН

IV ВСЕРОССИЙСКАЯ АКУСТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ,

совмещенная с XXXVIII сессией Российского научно-технического акустического общества

СБОРНИК ТРУДОВ

УДК 534

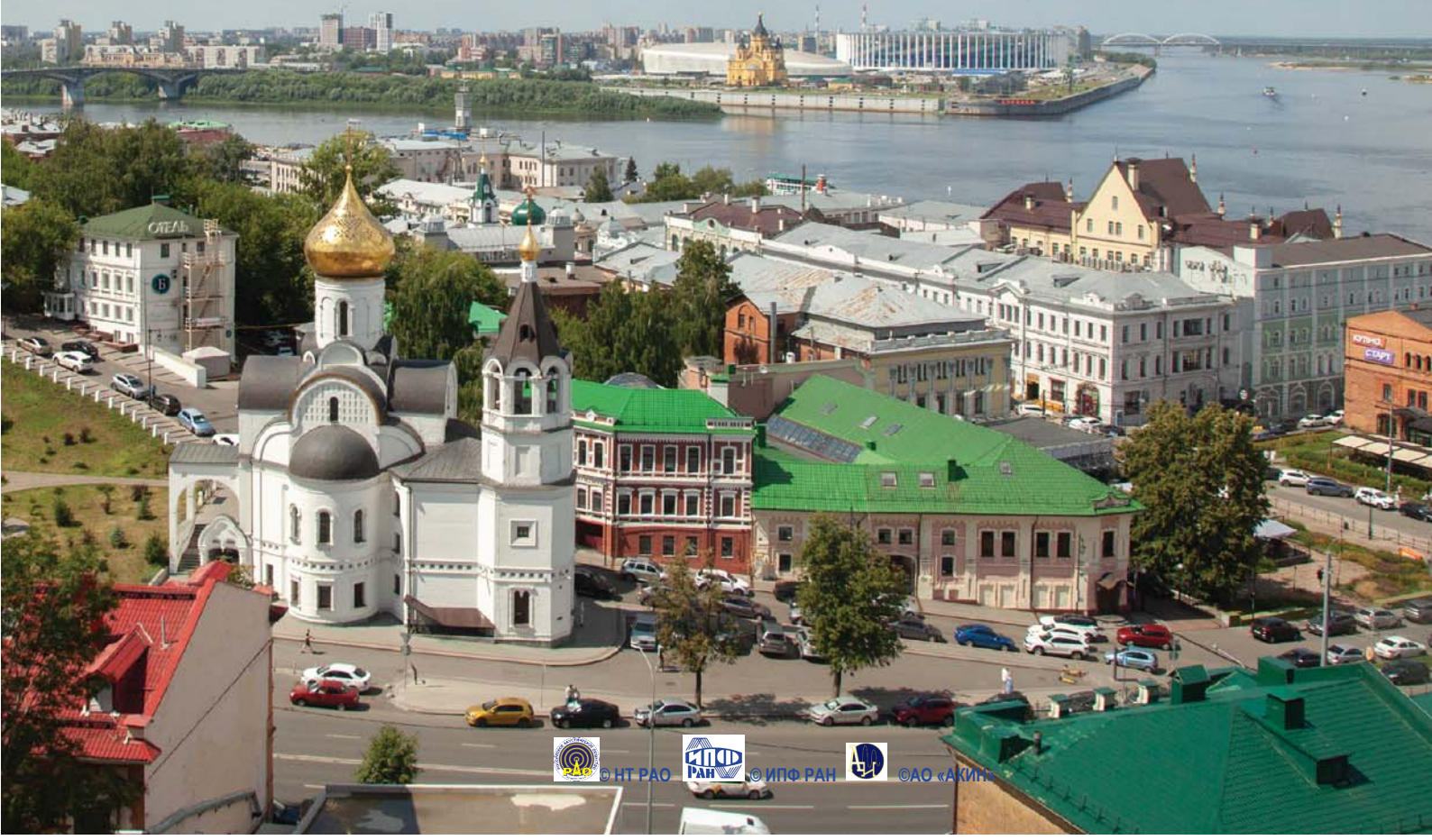
ISBN 978-56055594-4-3

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39428

Нижний Новгород

22 – 26 июня 2026 года

ООО "Издательство "ГЕОС"



© НТ РАО © ИПФ РАН ©АО «АКИН»

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ

- **Организаторы**
- **Программный комитет**
- **Спонсоры**
- **Предисловие**

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

1.СЕКЦИЯ АОГ – АКУСТИКА ОКЕАНА И ГИДРОАКУСТИКА

2.СЕКЦИЯ ФА – ФИЗИЧЕСКАЯ АКУСТИКА

3.СЕКЦИЯ АЭ – АКУСТОЭЛЕКТРОНИКА

4.СЕКЦИЯ РДВ – РАСПРОСТРАНЕНИЕ И ДИФРАКЦИЯ ВОЛН

5.СЕКЦИЯ АИС – АКУСТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И СТАНДАРТИЗАЦИЯ

6.СЕКЦИЯ АЭР – АЭРОАКУСТИКА

7.СЕКЦИЯ АММ – АКУСТИЧЕСКИЕ МЕТАМАТЕРИАЛЫ

8.МИНИ-СИМПОЗИУМ 2 МЕДИЦИНСКИЙ УЛЬТРАЗВУК: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И НОВЫЕ ЗАДАЧИ КЛИНИЧЕСКОЙ ПРАКТИКИ

9.СЕКЦИЯ ГА – ГЕОАКУСТИКА

10.СЕКЦИЯ АСА – АРХИТЕКТУРНАЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ АКУСТИКА

11.СЕКЦИЯ МА – МУЗЫКАЛЬНАЯ АКУСТИКА

12.СЕКЦИЯ АО –АКУСТООПТИКА

13.МИНИ-СИМПОЗИУМ 1 ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ В АКУСТИКЕ: СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И ПРИЛОЖЕНИЯ

14.СЕКЦИЯ МДА –МЕДИЦИНСКАЯ АКУСТИКА

15.СЕКЦИЯ УТ – УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

16.СЕКЦИЯ АР – АКУСТИКА РЕЧИ, АКУСТИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЛИНГВИСТИКИ

17.СЕКЦИЯ ШВ – ШУМЫ И ВИБРАЦИИ

18.СЕКЦИЯ БИО– БИОАКУСТИКА

19.СЕКЦИЯ НА – НЕЛИНЕЙНАЯ АКУСТИКА

20.СЕКЦИЯ АА – АТМОСФЕРНАЯ АКУСТИКА

КРУГЛЫЙ СТОЛ - ПРИКЛАДНАЯ АКУСТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ

Организаторы

Научный совет по акустике Российской академии наук

Федеральный исследовательский центр «Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова–Грехова Российской академии наук»

Общероссийская общественная организация «Российское научно-техническое акустическое общество»

АО «Акустический институт имени академика Н.Н. Андреева»

Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Фонд «Международный центр – фонд перспективных исследований в Нижнем Новгороде»

Спонсоры

Финансовую поддержку конференции оказали:

Группа компаний «Акустик Групп»

АО «Концерн «Океанприбор»

ООО «Научно-технический центр «Мониторинг»

СОПРЕДСЕДАТЕЛИ

Есипов Игорь Борисович – профессор, председатель Научного совета по акустике РАН (РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, АКИН
Максимов Герман Адольфович – президент Российского научно-технического акустического общества, начальник отделения АКИН
Мареев Евгений Анатольевич – академик РАН, заместитель директора по научной работе ИПФ РАН

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

Гурбатов Сергей Николаевич (ННГУ, Нижний Новгород) – сопредседатель
Руденко Олег Владимирович(МГУ, Москва) – сопредседатель
Бобровницкий Юрий Иванович (ИМАШ РАН, Москва)
Вировлянский Анатолий Львович (ИПФ РАН, Нижний Новгород)
Гусев Владимир Андреевич (МГУ, Москва)
Диденкулов Игорь Николаевич (ИПФ РАН, Нижний Новгород)
Дмитриев Константин Вячеславович (МГУ, Москва)
Егерев Сергей Викторович (ИНИОН РАН, Москва)
Егорова Марина Александровна (ИЭФБ РАН, Санкт-Петербург)
Ерофеев Владимир Иванович (ИПФ РАН, Нижний Новгород)
Канев Николай Георгиевич (АКИН, Москва)
Копьев Виктор Феликсович (ЦАГИ, Москва)
Коротин Павел Иванович (ИПФ РАН)
Кузнецова Ирен Евгеньевна (ИРЭ РАН, Москва)
Куличков Сергей Николаевич (ИФА РАН, Москва)
Ляксо Елена Евгеньевна (СПбГУ, Санкт-Петербург)
Макаров Денис Владимирович (ТОИ ДВО РАН, Владивосток)
Малеханов Александр Игоревич (ИПФ РАН, Нижний Новгород)
Миронов Михаил Арсеньевич (АКИН, Москва)
Монич Дмитрий Викторович (ННГАСУ, Нижний Новгород)
Петников Валерий Георгиевич (ИОФ РАН, Москва)
Поликарпова Наталья Вячеславовна (МГУ, Москва)
Сапожников Олег Анатольевич (МГУ, Москва)
Селезнев Игорь Александрович (Концерн «Океанприбор», Санкт-Петербург)
Собисевич Алексей Леонидович (ИФЗ РАН, Москва)
Тарасов Сергей Павлович (ИНЭП ЮФУ, Таганрог)
Томилина Татьяна Михайловна (ИМАШ РАН, Москва)
Хохлова Вера Александровна (МГУ, Москва)
Цукерников Илья Евсеевич (НИИСФ РААСН, Москва)
Чижов Виталий Юрьевич (ФГУП КГНЦ, Санкт-Петербург)
Шанин Андрей Владимирович (МГУ, Москва)
Шуруп Андрей Сергеевич (МГУ, Москва)

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Коротин Павел Иванович (ИПФ РАН) – сопредседатель
Малеханов Александр Игоревич (ИПФ РАН) – сопредседатель
Андрианова Татьяна Анатольевна (ИПФ РАН)
Баженова Екатерина Дмитриевна (АКИН, НТ РАО
Демин Игорь Юрьевич (ННГУ)
Диденкулов Игорь Николаеви (ИПФ РАН, Нижний Новгород)
Евтушенко Андрей Александрович (ИПФ РАН, МЦФПИН)
Казарова Анна Юрьевна (ИПФ РАН)
Калашников Леонид Борисович (ИПФ РАН)
Кротова Светлана Владимировна (ИПФ РАН)
Лабутина Мария Сергеевна (НИУ ВШЭ)
Салин Михаил Борисович (ИПФ РАН)
Смирнов Алексей Владимирович (ИПФ РАН)
Спивак Алексей Евгеньевич (ННГУ)
Усачева Ирина Андреевна (ИПФ РАН)
Чернов Владимир Викторович (ИПФ РАН)
Юдина Елена Васильевна (АКИН, НТ РАО)

Предисловие

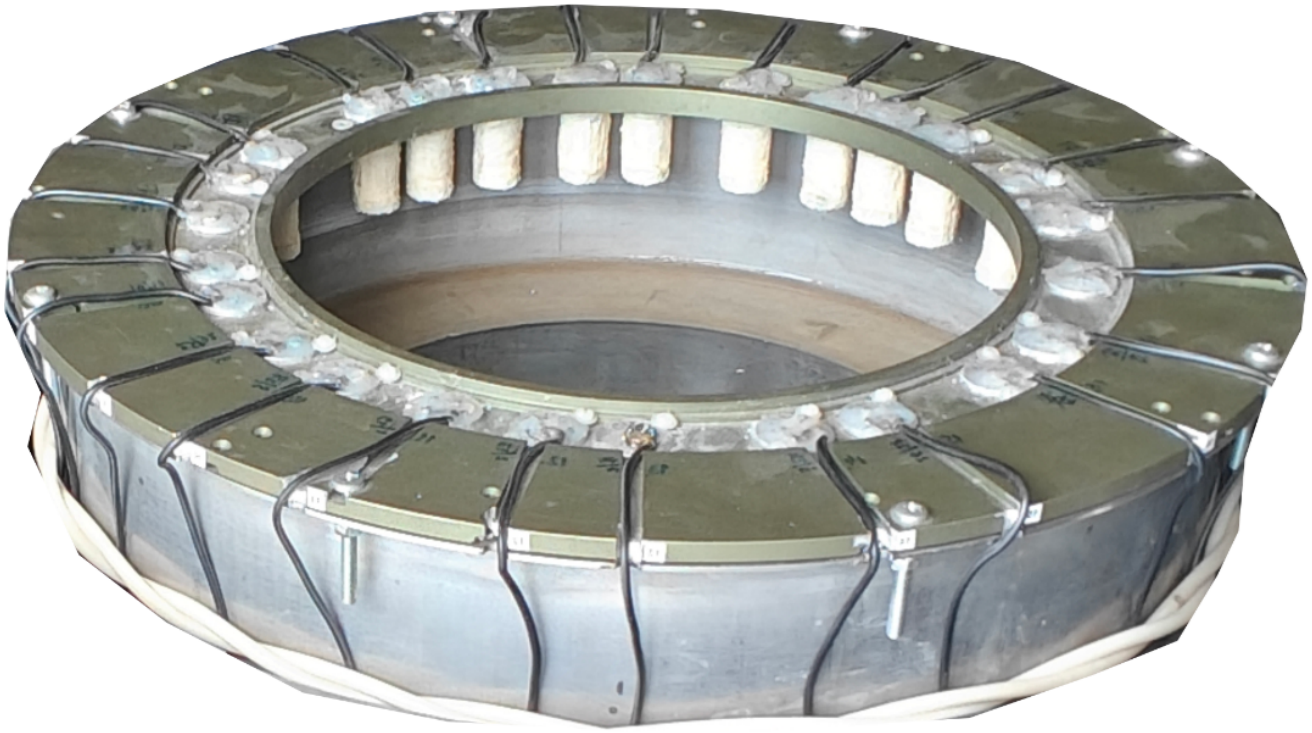
В июне 2026 года в Нижнем Новгороде состоялась IV Всероссийская акустическая конференция, совмещенная с XXXVIII сессией Российского научно-технического акустического общества (НТ РАО). Конференцию принимал в своих стенах Федеральный исследовательский центр «Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова–Грехова Российской академии наук», один из ведущих научных центров страны в области акустики и смежных областей.

По общему признанию участников, конференция прошла с большим успехом. На конференции были представлены около 350 докладов из многих научных центров и вузов страны (более 60), которые составили программу пленарных сессий и 16 тематических секций (традиционных для ежегодных политематических сессий НТ РАО), а также двух мини-симпозиумов, посвященных обсуждению междисциплинарных направлений исследований в области обратных задач акустики и медицинского ультразвука. Дополнительно к этому, в рамках конференции состоялось обсуждение ряда актуальных вопросов прикладной гидроакустики в формате «круглого стола». Подобное тематическое расширение научной программы акустических конференций представляется полезным опытом и может быть использовано в дальнейшем с учетом текущей актуализации отдельных направлений, особенно тех из них, которые затрагивают «интересы» сразу нескольких тематических секций.

Сборник трудов включает в себя материалы по представленным на конференции докладам. Большинство авторов направили в адрес Оргкомитета полные тексты своих докладов, что позволит читателю получить достаточно ясное представление о ведущихся в стране исследованиях по всем из обсуждавшихся направлений. Представленные в докладах результаты относятся как к фундаментальным, так и к прикладным исследованиям и техническим разработкам, которые связаны с развитием акустических технологий для самых различных применений. Значительная часть докладов (около 70) представлена на конференции молодыми учеными и аспирантами, что указывает на перспективы их дальнейшего профессионального роста и развития представленных ими исследований и разработок.

Таким образом, прошедшая конференция стала наиболее масштабным и авторитетным собранием отечественных специалистов в области акустики за последние годы. Широкое разнообразие тематики и высокий научный уровень представленных докладов свидетельствуют о том, что российская акустика развивается весьма успешно и сохраняет передовые позиции по многим актуальным направлениям исследований и разработок.

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ



назад к Содержанию

СОДЕРЖАНИЕ СЕКЦИИ ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

1. КРАТКИЙ ОБЗОР СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ В ИПФ РАН
Глявин М. Ю. 10

2. МАГНИТОУПРУГИЕ РЕЗОНАНСЫ И ВОЛНЫ В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ ФЕРРО- И АНТИФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ
Багданова Т.В., Калябин Д.В., Никитов С.А 12

3. ОБРАТНЫЕ АКУСТИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ В ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛАСТИНАХ И СТРУКТУРАХ
Кузнецова И. Е., Смирнов А.В., Дацук Е.Р., Недоспасов И.А. 13

4. О ПРОБЛЕМЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОВЕРШЕНСТВА СВЕРХЗВУКОВЫХ ПАССАЖИРСКИХ САМОЛЕТОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ ПО ПОКАЗАТЕЛЯМ ШУМА И ЗВУКОВОГО УДАРА
Копьев В. Ф., Сыпало К.И., Чернышев С.Л. 15

5. РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФКУСТИЧЕСКОЙ ТОМОГРАФИИ МЯГКИХ БИОЛОГИСЕСКИХ ТКАНЕЙ
Дмитриев К. В., Зотов Д.И., Румянцева О.Д. 16

6. БИОМЕДИЦИНСКАЯ ОПТОАКУСТИКА НА ПУТИ К АНГИОГРАФИИ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ
Субочев П. В. 26

7. РЕШЕНИЯ ВОЛНОВОГО УРАВНЕНИЯ С ПРОИЗВОЛЬНЫМИ ФУНКЦИЯМИ
Киселев А. П., Плаченов А.Б. 28

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39429

Краткий обзор современного состояния исследований в ИПФ РАН

М.Ю. Глявин

ФИЦ «Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова–Грехова Российской академии наук», 603951 Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

Тел: +7 (831) 432-14-11

E-mail: glyavin@ipfran.ru

С первых лет своего создания в 1977 году, ИПФ РАН является институтом широкого профиля, сочетающим фундаментальные и прикладные исследования на основе радиофизики как физики колебательных и волновых явлений в самых разных средах и частотных диапазонах. В настоящее время к основным направлениям работ института относятся как традиционные для него направления — электроника больших мощностей, физика плазмы, физика атмосферы и ближнего космоса, гидрофизика, акустика, лазерная оптика, нелинейная динамика, так и более «молодые» направления — дистанционная диагностика различных сред, акустическое проектирование сложных виброактивных систем и конструкций, природные катастрофы, исследования климата, квантовые явления, нано- и био-фотоника. Институт широко известен результатами, связанными с разработкой и применением уникальных источников излучения различных частотных диапазонов. К примеру, мощные генераторы когерентного микроволнового излучения — гиротроны — используются в установках нагрева плазмы, включая строящиеся международный термоядерный реактор ITER и российский токамак с реакторными технологиями ТРТ, в установках по обработке и модификации материалов. Работы в области нелинейной и адаптивной оптики послужили основой для создания в ИПФ РАН сверхмощных лазерных систем, в том числе, первого в мире лазерного комплекса петаваттного уровня мощности, основанного на параметрическом усилении фемтосекундных импульсов. Дальнейшее совершенствование таких систем открывает принципиально новые возможности экспериментального исследования взаимодействия экстремальных световых полей с веществом. К передовым разработкам относятся также излучающие и приемные комплексы, созданные в ИПФ РАН для решения задач низкочастотной акустики океана, гидроакустической метрологии, сейсмоакустики.

В докладе особо подчеркнута выдающаяся роль академика А.В. Гапонова–Грехова — организатора и первого директора ИПФ РАН на протяжении 25 лет — в формировании современного научного облика и уровня достижений института. Столетний юбилей со дня

рождения Андрея Викторовича (7 июня 2026 года) практически совпал с днями проведения конференции.

Ключевые слова: радиофизика, волновые и колебательные процессы, электроника больших мощностей, электродинамика плазмы, сверхмощные лазерные комплексы, акустическая диагностика природных сред, гидроакустика.

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39430

Магнитоупругие резонансы и волны в гетероструктурах на основе ферро- и антиферромагнитных материалов

Багданова Т.В., Калябин Д.В., Никитов С.А.

[1] *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова Российской академии наук, 125009, Москва, Россия, Моховая ул., д. 11, стр. 7.*

Будут представлены ключевые научные результаты, полученные для управляемых структур на основе анти- и ферромагнитных материалов, а также их гетероструктур с немагнитными компонентами. На примере синтетической мультиферроидной структуры α-Fe_2O_3/68%Pb(Mg1/3Nb2/3O_3-32%$PbTiO_3$ (PMN-PT) продемонстрировано эффективное управление магнитной анизотропией с помощью электрического напряжения. С использованием мандельштам-бриллюэновской спектроскопии было проведено экспериментальное исследование возбуждения квазиферро- и антиферромагнитных мод в α-Fe_2O_3, а также влияние индуцированных деформаций поляризованного пьезоэлектрического слоя на частоты этих мод. Для кристаллических срезов PMN-PT [001] и [011] были изучены зависимости частоты квазиферромагнитной моды от вращения магнитного поля в плоскости при приложенном электрическом поле с напряжением 0–1000 В, а для антиферромагнитной моды продемонстрирована гистерезисная перестройка частоты электрическим напряжением в биполярном режиме.

Ключевые слова: анти- и ферромагнитные материалы, магнитная анизотропия пьезоэлектрический слой

УДК: 534.2, 534-16. DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39431

Обратные акустические волны в пьезоэлектрических пластинах и структурах

И.Е. Кузнецова[1,a], А.В. Смирнов[1], Е.Р. Дацук[1], И.А. Недоспасов[1]

[1] Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова Российской академии наук, 125009, Москва, Россия, Моховая ул., д. 11, стр. 7.

E-mail: [a]kuziren@yandex.ru

Обратные акустические волны характеризуются аномальной дисперсией и противоположно направленными фазовой и групповой скоростями. В докладе представлены результаты исследования распространения обратных волн в пьезоэлектрических пластинах и структурах на их основе. Обсуждаются вопросы уширения частотной области их существования, возможности управления частотой точки с нулевой групповой скоростью. Исследовано влияние различных механических и электрических граничных условий на их свойства. Исследовано влияние температуры и внешних электрических полей на их фазовую скорость. Показана возможность использования подобных волн для реализации высокоэффективных химических сенсоров.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 25-19-00872.

Ключевые слова: обратные акустические волны, пьезоэлектрические пластины, электрические граничные условия, влияние температуры, влияние внешних электрических полей

Backward acoustic waves in piezoelectric plates and structures

I.E. Kuznetsova[1,a], A.V. Smirnov[1], E.R. Datsuk[1], I.A. Nedospasov[1]

[1] Federal State Budgetary Institution of Science V.A.Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences, 11-7 Mokhovaya St., Moscow, 125009, Russia.

E-mail: [a]kuziren@yandex.ru

Backward acoustic waves are characterized by anomalous dispersion and opposite directions of phase and group velocities. This report presents the results of a study on the propagation of backward waves in piezoelectric plates and structures based on them. Issues related to broadening the frequency range of their existence and the possibility of controlling the frequency of the zero-group-velocity point are discussed. The influence of various mechanical and electrical boundary conditions on their properties is investigated. The effects of temperature and external electric fields on their phase velocity are examined. The potential of using such waves for the realization of highly efficient chemical sensors is demonstrated.

This work was supported by the Russian Science Foundation (RSF) Grant No. 25-19-00872.

Keywords: backward acoustic waves, piezoelectric plates, electrical boundary conditions, temperature effect, effect of external electric fields.

PACS: 43.00.00.

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39432

О проблеме экологического совершенства сверхзвуковых пассажирских самолетов нового поколения по показателям шума и звукового удара

В.Ф. Копьев, К.И. Сыпало, СЛ. Чернышев

ФАУ «ЦАГИ», г. Жуковский, Россия
vkopiev@mktsagi.ru

Будущие сверхзвуковые гражданские самолеты должны решать новые задачи, которые не стояли перед Ту-144 и Конкордом на этапе их проектирования. Одной из важнейших задач при этом является соблюдение норм по шуму, которые значительно ужесточились со времен 1960-1970х годов. Дозвуковая авиация с тех пор прошло длинный путь совершенствования характеристик самолета и в первую очередь двигателя, перейдя на двигатели большой и очень большой степени двухконтурности, что является неприемлемым для сверхзвуковых самолетов. Другой проблемой, специфичной для сверхзвуковых самолетов, является звуковой удар. Уровни звукового удара, которые население готово рассматривать как приемлемые, также значительно снизились со времен создания сверхзвуковых пассажирских самолетов первого поколения. Таким образом, к разрабатываемым сверхзвуковым летательным аппаратам предъявляются все более жесткие экологические требования, а вопрос воздействия перспективных сверхзвуковых гражданских самолетов на окружающую среду становится сегодня одним из определяющих при выборе их облика.

Ключевые слова: сверхзвуковой гражданский самолет, шум на местности, звуковой удар, авиационная экология

УДК: 534.8:519.24 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39433

Развитие методов экспериментальной акустической томографии мягких биологических тканей

К.В. Дмитриев [1,2 а)], Д.И. Зотов [1,б)]

[1] *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра акустики. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.*

[2] *Институт вычислительной математики и математической геофизики (ИВМиМГ), СО РАН,* 630090*, Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 6.*

E-mail: [a] kdmitrie@gmail.com, [b] zotovdi@mail.ru

Представлен краткий обзор методов исследования мягких биологических тканей человека с целью ранней диагностики онкологических заболеваний. Среди них акустические методы отличаются низкой стоимостью и безопасностью для пациентов, что делает их перспективными для проведения массовых обследований. В России и за рубежом ведутся разработки акустических томографов – устройств многоракурсного сканирования. Они позволяют получать количественные данные о структуре среды с разрешающей способностью, достигающей долей миллиметра, т.е. сопоставимой с изображениями МРТ. Это дает возможность переходить к клиническим испытаниям метода с участием реальных пациентов.

Ключевые слова: методы томографии, ультразвуковые томографы, обратная задача рассеяния, итерационные и функциональные алгоритмы.

Development of experimental acoustic tomography methods for soft biological tissues

K.V. Dmitriev[1,a], D.I. Zotov[2,b]

[1] *Department of acoustics, Faculty of Physics, M.V.Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia.*

[2] *Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, SB RAS, Novosibirsk, 630090, Russia.*

E-mail: [a]kdmitrie@gmail.com, [b]zotovdi@mail.ru

Abstract: This article presents a brief review of methods for examining human soft biological tissues for the early diagnosis of cancer. Among these, acoustic methods are characterized by their low cost and safety for patients, making them promising for mass screening. Acoustic tomographs – multi-angle scanning devices – are being developed in Russia and abroad. They enable receiving

quantitative data on the structure of the medium with a resolution of up to a fraction of a millimeter that is comparable to MRI images. This makes it possible to move on to clinical trials of this method in real patients.

Keywords: tomography methods, ultrasound tomographs, inverse scattering problem, iterative and functional algorithms

PACS: 43.60.-c, 42.30.Wb, 02.30.Zz

Введение

Среди множества онкологических заболеваний рак молочной железы имеет особое значение. Во-первых, онкология этого типа широко распространена и, по данным ВОЗ [1], возникает в течение жизни у каждой двенадцатой женщины. Во-вторых, успешное и эффективное лечение возможно при условии раннего обнаружения заболевания, когда размер опухоли не превосходит долей миллиметра. Однако на этой стадии симптомы отчетливо не проявляются, что затрудняет обнаружение болезни. Решением, по-видимому, является разработка методов и процедур массового сканирования населения в рамках плановой диспансеризации. Такие процедуры должны обладать высокими значениями чувствительности и специфичности, быть дешевыми и безопасными для пациентов. Кроме того, они не должны накладывать повышенных требований к квалификации медицинского персонала, которые не могут быть удовлетворены в рамках массового обследования. Последнее обстоятельство подчеркивает преимущество использования количественных методов диагностики, позволяющих измерить численные значения тех или иных физических параметров биологических тканей, по сравнению с чисто качественными методами, результатом работы которых являются изображения, требующие дальнейшей интерпретации.

Подходы, которые позволили бы в полной мере решать поставленную задачу, еще до конца не разработаны. Так, относительно дешевые методы **компьютерной томографии (КТ)**, основанные на сканировании с использованием рентгеновского излучения, подвергают пациента лучевой нагрузке и могут быть небезопасными. Помимо этого, поскольку при маммографии речь идет о сканировании мягких биотканей, рентгенологический контраст которых относительно низок, полученные изображения не всегда обладают высокой информативностью, и тогда выявление новообразований с их помощью затруднительно. Еще более существенной лучевой нагрузке пациенты подвергаются при **гамма- или позитрон-эмиссионной томографии**, основанной на введении в организм радиоактивных препаратов. Наибольшую полноту информации о структуре внутренних органов в настоящее время можно получить с помощью **магнитно-резонансной томографии (МРТ)**. Она способна обеспечить разрешающую способность в доли миллиметра (в зависимости от величины

создаваемого аппаратом магнитного поля) как вблизи поверхности, так и в глубине тела. МРТ позволяет проводить измерения с введением контрастных агентов, что еще больше повышает его информативность. Эти преимущества делают МРТ на сегодняшний день “золотым стандартом” в области обнаружения рака молочной железы. При этом необходимость создания сильных магнитных полей приводит к высокой стоимости аппаратуры и проводимых исследований, не позволяя говорить о массовых обследованиях этим методом. **Электроимпедансная томография**, основанная на измерении на поверхности тела потенциалов, возникающих при пропускании через него электрического тока, дешева и безопасна для пациентов. Однако ее разрешающая способность сильно зависит от числа используемых электродов, которое, как правило, невелико. В результате, на практике для систем двумерного томографирования она составляет единицы миллиметров, что для ранней диагностики онкологии является недостаточным.

Исследования, использующие в своей основе акустическое излучение, дешевы и безопасны. Вместе с тем, распространение звука в неоднородной среде сопровождается эффектами рефракции и поглощения. В результате, искажение падающего акустического поля зависит от неоднородностей среды существенно нелинейным образом, и задача их определения по результатам экспериментальных измерений оказывается очень сложной. Широко распространенным классом акустических методов является **ультразвуковое исследование (УЗИ)**, включающее в себя излучение вглубь тела коротких акустических импульсов и прием отраженных сигналов. В результате получаются качественные изображения структуры ткани, яркость каждой точки которых связана с величиной градиента акустического импеданса. Однако отсутствие точной информации о пространственном распределении скорости звука в среде (эту характеристику как раз и предстоит определить акустическими методами) не позволяет однозначно установить связь между временем прихода сигналов, отраженных от неоднородности среды, и глубиной ее расположения. В итоге, диагностику опухолей на ранней стадии может проводить лишь высококвалифицированный специалист, и при массовом применении данный метод нельзя считать вполне надежным. **Эластографические исследования** – другой подход, основанный на измерении скоростей продольных и сдвиговых акустических волн с последующим картированием модулей сжатия и сдвига. Высокая чувствительность модуля сдвига к типу биоткани обеспечивает преимущество данного метода. С другой стороны, небольшое число ракурсов обследования делает его похожим на УЗИ со всеми присущими последнему недостатками. В результате специфичность метода ухудшается. **Оптоакустическая томография** представляет собой процедуру облучения органа коротким лазерным импульсом с последующей регистрацией в широком частотном диапазоне акустических

волн, вызванных расширением среды при ее нагреве. Являясь по сути похожим на УЗИ, данный метод обеспечивает существенно лучшее пространственное разрешение, особенно в приповерхностной области. В глубине тела разрешающая способность падает как из-за поглощения оптического излучения, так и из-за процессов рассеяния акустических волн. Увеличение сложности аппаратуры и ее стоимости по сравнению с УЗИ при этом невелико, что делает этот подход весьма перспективным.

Системы акустической томографии

В отличие от рассмотренных выше методов, акустическая томография (АТ) обеспечивает многостороннее сканирование исследуемых объектов акустическим полем, а также многосторонний прием. Такое многоракурсное обследование позволяет вместо простой интерпретации отраженных сигналов поставить и решить обратную задачу рассеяния в двумерной или трехмерной области, восстановив тем самым томограммы – пространственные распределения численных значений нескольких акустических характеристик среды. Как правило, к таким характеристикам относятся скорость звука и коэффициент поглощения, а также плотность среды. Разрешающая способность методов АТ достигает долей миллиметра, т.е. сравнима с МРТ [2]. При этом стоимость обследования оказывается существенно ниже, чем в МРТ. Преимущества АТ по сравнению с методами типа УЗИ обусловлены именно большим числом углов, под которыми на объект последовательно излучаются и с которых принимаются акустические волны. Ценой этого является не только усложнение техники, обеспечивающей измерения, но и существенное усложнение математического аппарата, необходимого для решения обратной задачи рассеяния, и численных алгоритмов. Этими вопросами в разное время занимались многие исследователи и научные группы. В России среди них можно отметить академика РАН Л.Д. Фаддеева, коллективы под руководством А.В. Гончарского, С.Ю. Романова, А.Г. Яголы, А.Б. Бакушинского, П.Г. Гриневича, А.М. Денисова (МГУ им. М.В.Ломоносова, Москва), М.И. Белишева (Санкт-Петербургское отделение Математического института им. В.А. Стеклова РАН), Л.Н. Пестова (Балтийский федеральный университет им. Иммануила Канта, г. Калининград), член-корреспондента РАН С.И. Кабанихина и М.А. Шишленина (Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск), Р.Г.Новикова (Институт теории прогноза землетрясений РАН, Москва; а также Ecole Polytechnique, Париж, Франция). За рубежом существенный вклад внесли A.J. Devaney, R.G. Newton, P.C. Sabatier, Prosser R.T. и др., а также коллективы, упоминаемые ниже. Этот список, конечно, не может быть исчерпывающим.

К настоящему времени всего нескольким научным коллективам удалось реализовать аппараты АТ на практике (обзор этих результатов по состоянию на 2015 год приведен в [3]). Здесь можно выделить два способа построения томографической схемы измерений.

В рамках первого способа (3D-томография), который разрабатывается в группе исследователей Hopp T., Zuch F., Zapf M., Ruiter N.V. и др. (Германия, Карлсруэ) [4], осуществляется полное трехмерное сканирование объекта. Антенная решетка представляет собой окружающую исследуемый объект полусферу (или, в более раннем варианте, половину эллипсоида) диаметром 34 см. На ней размещаются 2304 элемента, каждый из которых может работать как в режиме излучения акустического поля, так и в режиме его приема. Центральная частота излучения составляет 2.6 МГц; оцифровка принятых сигналов осуществляется с частотой дискретизации 20 МГц. Для расширения объема входных данных антенная решетка дополнительно сдвигается на расстояние до 7.5 мм и поворачивается на угол до 5°. Общее время томографирования составляет 7.5 минут. Объем данных, получающихся при использовании метода 3D акустической томографии, весьма велик, и его обработка выполняется в несколько этапов. На первом этапе восстанавливается грубая карта искомых характеристик среды с использованием лучевого приближения [5]. Далее этот результат используется в итерационной схеме инверсии, позволяющей в итоге получить высококачественное изображение.

В рамках второго способа трехмерное изображение строится синтезом из отдельных двумерных томограмм, полученных при послойном сканировании объекта. Эти методы получили название 2.5 D-томографии, поскольку они занимают промежуточное положение между чисто двумерными и трехмерными подходами. Несомненным достоинством 2.5 D-томографии является ее относительная техническая простота: сканирование осуществляется антенной решеткой (часто кольцевой формы), которая может содержать гораздо меньшее преобразователей, чем в 3D-томографии. Цена этого преимущества – необходимость введения дополнительной процедуры, обеспечивающей корректное объединение данных от индивидуальных слоев.

Больших успехов в разработке устройств 2.5 D-томографии добилась группа исследователей из США под руководством N. Duric (Karmanos Cancer Institute, Detroit) [2, 6]. В рамках основанной ими компании Delphinus Medical Technologies они разработали систему SoftVue, которая к настоящему моменту прошла аккредитацию FDA и допущена к клиническим исследованиям рака молочной железы в США. Устройство функционирует в полностью автоматическом режиме, осуществляя послойное сканирование молочной железы с помощью кольцевой антенной решетки, которая содержит 2048 приемоизлучающих преобразователей и перемещается вдоль своей вертикальной оси при переходе от слоя к

слою. Съем данных осуществляется на центральной частоте 3 МГц [6]. В рамках каждого из слоев в результате томографирования осуществляется одновременное картирование скорости звука, коэффициента его поглощения и коэффициента отражения. Далее, изображения коэффициентов отражения и поглощения улучшаются с использованием информации о скорости звука, и на этой основе получаются еще два новых изображения: “улучшенный коэффициент отражения” и относительная жесткость ткани (псевдоэластометрический режим измерений). Комбинирование этих пяти изображений позволяет существенно улучшить постановку диагноза, поскольку их совокупность несет в себе более богатую информацию. Заявленная разрешающая способность метода зависит от типа изображения и достигает 0.75 мм [6].

Еще одна группа из США (Wiskin J., Borup D.T., Johnson S.A., Berggren M. и др.) ведет исследования в области акустической 2.5 D-томографии уже более 50 лет. Разработанные ими системы сканирования [7] включают в себя пять антенных решеток. Две из них используются в трансмиссионном режиме: одна решетка создает квазиплоскую падающую волну, а вторая служит для регистрации поля «на просвет» в каждой своей точке. Каждая из решеток содержит 8 горизонтальных рядов по 192 преобразователя. Еще три антенных решетки используются в режиме «на отражение». Для улучшения концентрации акустического поля внутри сканируемого слоя используется акустическая линза. Измерения могут проводиться в широком диапазоне частот 0.3–1.3 МГц с применением частотно-модулированных импульсов. Параметры среды определяются на первом шаге из “просветных” данных с использованием параболического приближения, а на втором шаге используется метод сопряженного градиента для минимизации невязки между экспериментальными данными и данными рассеяния акустического поля, рассчитанными для текущей оценки пространственного распределения параметров среды [8]. Постепенное повышение частоты, на которой ведется восстановление, повышает устойчивость алгоритма. Дополнительно разрабатываются эффективные алгоритмы сегментации изображений для улучшения их клинической интерпретируемости [9].

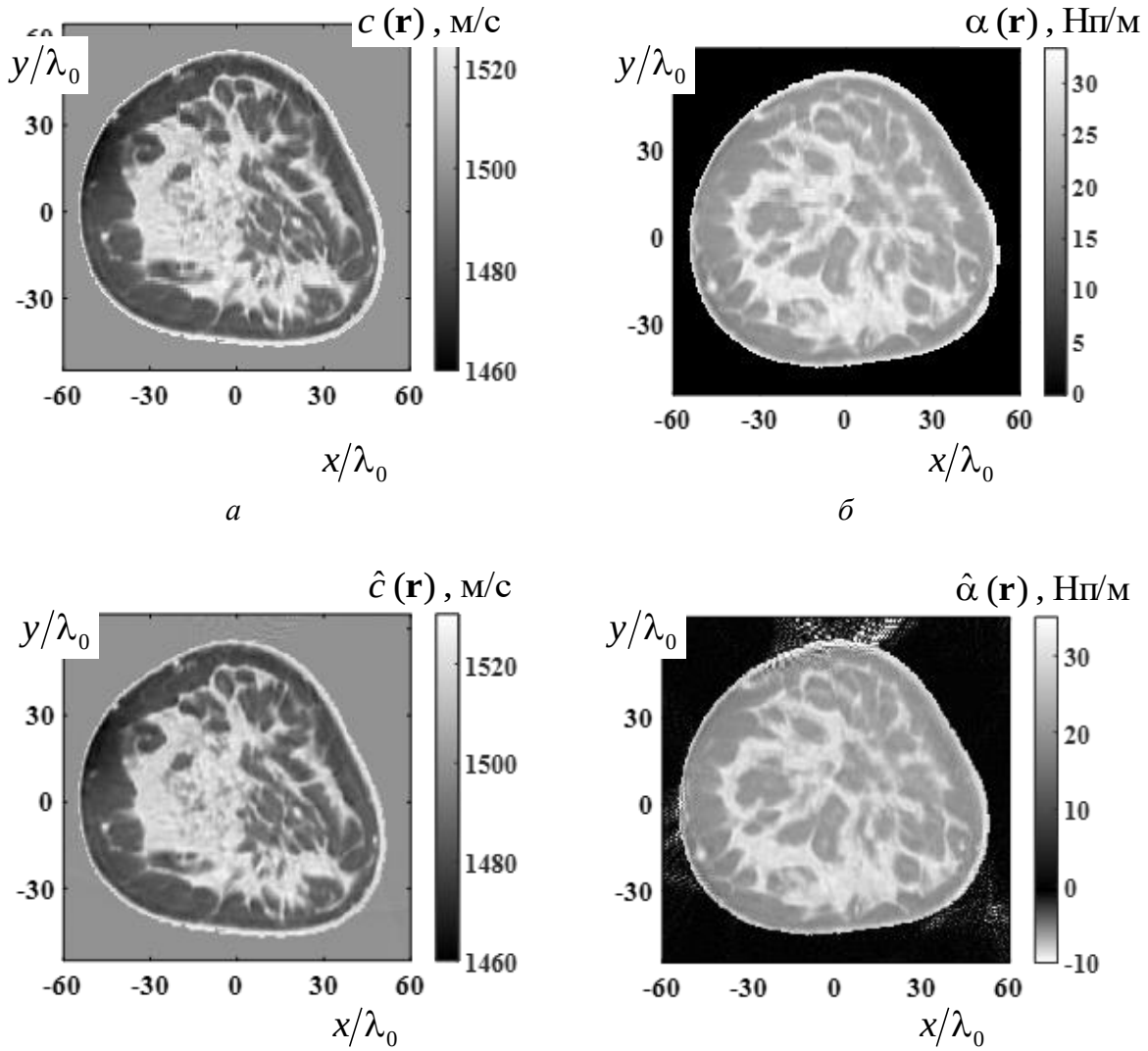
В России также есть группы, разрабатывающие системы ультразвуковой диагностики и алгоритмы обработки экспериментальных данных. Так, в группе А.В. Гончарского (НИВЦ МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва) имеется патент (№ 036092 от 2018.07.18) на устройство для получения томографических изображений внутренней структуры молочной железы. Это устройство содержит небольшое (не более 50) число приемоизлучающих элементов, которые работают на относительно низких частотах (50–600 кГц). Другой вариант томографа, разрабатывавшийся в этой группе, включает только два активных приемоизлучающих элемента.

Ультразвуковой томограф, разрабатываемый в коллективе авторов представляемой работы, относится к системам 2.5 D-томографии [10 (глава 8)]. В отличие от зарубежных аппаратов, он содержит всего 26 приемоизлучающих пьезоэлементов, которые расположены на вращающейся кольцевой антенной решетке (рис. 1). За счет неравномерного расположения преобразователей и специально рассчитанных их угловых позиций, в сочетании с дискретным вращением антенны, удается получить синтезированную антенную решетку, эквивалентную 256-ти неподвижным преобразователям. Это позволяет упростить разработку блока электронного управления. Кроме того, антенна может перемещаться по вертикали для перехода от одного томографируемого слоя к другому. Время съема данных для каждого горизонтального слоя составляет около 60 секунд.

Для томографических измерений используются импульсные сигналы с центральной частотой около $f_0 = 1.25$ МГц и шириной рабочей полосы около $\Delta f = 300$ кГц. Сигналы, пришедшие на каждый из приемников, оцифровываются 12-битными АЦП с частотой дискретизации 5 МГц.



Рис. 1. Внешний вид разреженной антенной решетки ультразвукового томографа с неравномерным расположением приемоизлучающих преобразователей.



а *б*

в *г*

Рис. 2. Исходное пространственное распределение скорости звука $c(\mathbf{r})$ (*а*) и коэффициента поглощения $\alpha(\mathbf{r})$ (*б*) в двумерном сечении молочной железы. Результат томографического восстановления этих распределений $\hat{c}(\mathbf{r})$ (*в*) и $\hat{\alpha}(\mathbf{r})$ (*г*) с помощью функционального алгоритма в монохроматическом режиме на частоте 1.5 МГц (длина волны $\lambda_0 = 1$ мм); в оценке $\hat{\alpha}(\mathbf{r})$ (*г*) заметны артефакты, которые устраняются при использовании многочастотного режима.

В волновых алгоритмах, предназначенных для восстановления томограмм в виде скорости звука, коэффициента поглощения и, при необходимости, плотности среды, частотная полоса Δf может разбиваться на ≈ 150 диапазонов. Разбиение используется, например, в многочастотных вариантах функциональных алгоритмов, изначально разрабатывавшихся для решения обратных квантово-механических задач [11–13] и впоследствии адаптированных для получения томограмм упомянутых акустических параметров [14]. Так, акустические томограммы молочной железы (рис. 2), подобные МРТ-томограммам [15], восстановлены одним из функциональных алгоритмов [12, 16].

Заключение

К настоящему времени достигнут прогресс в развитии как математических методов решения обратных задач, так и в совершенствовании и ускорении вычислительной техники. Вместе с тем, сложности создания многоканальных систем регистрации акустических полей, обеспечивающих необходимые экспериментальные условия, еще остаются. Тем самым, исследования в области акустической томографии часто ограничиваются численными моделями, а эксперименты, включая клинические, проводятся всего несколькими научными группами. Тем не менее, уже достигнутые результаты позволяют говорить о возможности раннего обнаружения онкологических заболеваний с помощью акустической томографии.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-61-00027, https://rscf.ru/project/25-61-00027/

Список литературы

1. Всемирная организация здравоохранения. Информационный бюллетень. Рак молочной железы. https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/breast-cancer.
2. *Duric N., Littrup P.* Breast ultrasound tomography. In “Breast Imaging”, Kuzmiak C.M., ed., ch. 6, IntechOpen, Rijeka, 2017.
3. *Буров В.А., Зотов Д.И., Румянцева О.Д.* Восстановление пространственных распределений скорости звука и поглощения в фантомах мягких биотканей по экспериментальным данным ультразвукового томографирования. // Акуст. журн. 2015. **61**, № 2. С. 254.
4. *Ruiter N.V., Pfistner P., Zapf M., Lu Z., Kraft S.E., Hopp T.* Image Based Motion Tracking for 3D Ultrasound Tomography. // IEEE International Ultrasonics Symposium. 2025. P. 1.
5. *Ruiter N.V., Kretzek E., Zapf M., Hopp T., Gemmeke H.* Time of Flight Interpolated Synthetic Aperture Focusing Technique. // Medical Imaging 2017: Ultrasonic Imaging and Tomography, SPIE. 2017. P. 1.

6. *Littrup P.J., Duric N., Sak M., Li C., Roy O., Brem R.F., Larsen L.H., Yamashita M.* Multicenter Study of Whole Breast Stiffness Imaging by Ultrasound Tomography (SoftVue) for Characterization of Breast Tissues and Masses. // J. Clin. Med. 2021. **10**. Art no. 5528.

7. *Anzola M.L., Alberico D., Yip J., Wiskin J, Malik B., Dinu R., Curpen B., Oelze M.L., Czarnota G.J.* Quantitative Volumetric Analysis Using 3D Ultrasound Tomography for Breast Mass Characterization. // Tomography. 2025. **111.** N 1. P. 1.

8. *Wiskin J., Borup D., Iuanow E., Klock J., Lenox M.W.* 3D Nonlinear Acoustic Inverse Scattering: Algorithm and Quantitative Results. // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. 2017. V. 64. N. 8. P. 1161.

9. *Wiskin J., Malik B., Natesan R., Lenox M.* Quantitative Assessment of Breast Density Using Transmission Ultrasound Tomography. // Med. Phys. 2019. **46.** N 6. P. 2610.

10. *Буров В.А., Румянцева О.Д.* Обратные волновые задачи акустической томографии. Ч. 2: Обратные задачи акустического рассеяния. ЛЕНАНД. М., 2020.

11. *Фаддеев Л. Д.* Обратная задача квантовой теории рассеяния II. // Сб.: Современные проблемы математики. М.: ВИНИТИ, 1974. **3**. С. 93.

12. *Новиков Р.Г.* Приближенное решение обратной задачи квантовой теории рассеяния при фиксированной энергии в размерности 2. // Сб.: Труды Математического института им. В. А.Стеклова. Солитоны, геометрия, топология – на перекрестках. М.: Наука, 1999. **225**. С. 301.

13. *Гриневич П.Г., Манаков С.В.* Обратная задача теории рассеяния для двумерного оператора Шредингера, $\overline{\partial}$-метод и нелинейные уравнения. // Функцион. анализ и его прил. 1986. **20**. № 2. С. 14.

14. *Буров В.А., Румянцева О.Д.* Обратные волновые задачи акустической томографии. Ч. 4: Функционально-аналитические методы решения многомерной акустической обратной задачи рассеяния. ЛЕНАНД. М., 2024.

15. https://rentgenogram.ru/product-category/myagkie-tkani/molochnye-zhelezy/

16. *Зотов Д.И., Румянцева О.Д., Черняев А.С.* Восстановление пространственного распределения акустических характеристик на основе аппарата угловых гармоник. // Известия Российской Академии Наук. Серия Физическая. 2025. **89**. № 1. С. 107.

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39434

Биомедицинская оптоакустика: на пути к ангиографии реального времени

Субочев П.В.

Лаборатория ультразвуковой и оптоакустической диагностики, Отдел радиофизических методов в медицине, Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук, Нижний Новгород

Тел.: +7(904)399-7916$ E-mail: pavel.subochev@gmail.com

Биомедицинская оптоакустика – гибридный метод структурной и функциональной диагностики, сочетающий оптический контраст с масштабируемым акустическим разрешением. При этом информативность, глубина зондирования и скорость получения оптоакустических изображений сегодня во многом определяются не только характеристиками импульсных лазерных источников с перестраиваемой длиной волны, но и технологиями широкополосной высокочувствительной ультразвуковой регистрации и томографической реконструкции.

Доклад посвящен эволюции современных оптоакустических систем от сканирующих микроскопов к передовым многоканальным установкам высокоскоростной объемной томографии. Акцент будет сделан на разработке и применении широкополосных пьезополимерных пленочных детекторов и многоэлементных сферических антенных решеток, обеспечивающих возможность так называемой 5D оптоакустической визуализации (объемной, спектроскопической, в режиме реального времени). Будет рассмотрено влияние параметров приемного тракта и геометрии антенн на качество томографической реконструкции.

Практический потенциал представленных аппаратных решений будет продемонстрирован на ряде современных биомедицинских приложений. Будут представлены результаты оптоакустического мониторинга процессов ангиогенеза в задачах экспериментальной онкологии, неинвазивной оценки быстрой церебральной гемодинамики и функционального состояния мозга мелких лабораторных животных, а также диагностики поверхностных тканей человека.

Благодарности: РНФ (проект № 25-45-20023).

Ключевые слова: биомедицинская оптоакустика; оптоакустическая томография; широкополосные ультразвуковые детекторы; пьезополимерные пленки; 5D-визуализация; микроангиография; гемодинамика.

Biomedical optoacoustics: toward real-time angiography

Subochev P.V.

Laboratory of Ultrasound and Optoacoustic Diagnostics, Department of Radiophysical Methods in Medicine, A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod

Phone: +7 904 399 7916

E-mail: pavel.subochev@gmail.com

Biomedical optoacoustics is a hybrid method of structural and functional diagnostics that combines optical contrast with scalable acoustic resolution. At the same time, the informativeness, probing depth, and acquisition speed of optoacoustic images are now determined to a large extent not only by the characteristics of pulsed laser sources with tunable wavelength, but also by technologies for broadband high-sensitivity ultrasonic detection and tomographic reconstruction.

The lecture is devoted to the evolution of modern optoacoustic systems from scanning microscopes to advanced multichannel platforms for high-speed volumetric tomography. The emphasis will be placed on the development and application of broadband piezopolymer film detectors and multi-element spherical antenna arrays, which enable so-called 5D optoacoustic imaging (volumetric, spectroscopic, and real-time imaging). The influence of receiver-chain parameters and antenna geometry on the quality of tomographic reconstruction will be considered.

The practical potential of the presented hardware solutions will be demonstrated in a number of modern biomedical applications. Results of optoacoustic monitoring of angiogenesis in experimental oncology, noninvasive assessment of rapid cerebral hemodynamics and functional brain state in small laboratory animals, as well as diagnostics of superficial human tissues will be presented.

Acknowledgements: RSF (project No. 25-45-20023).

Keywords: biomedical optoacoustics; optoacoustic tomography; broadband ultrasonic detectors; piezopolymer films; 5D imaging; microangiography; hemodynamics

УДК: 534.2, 535.13 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39435

Решения волнового уравнения с произвольными функциями

А.П. Киселев[1,2,a], А.Б. Плаченов[3,b]

[1] *Санкт-Петербургское отделение математического института им. В.А. Стеклова РАН. 191023, Санкт-Петербург, наб. р. Фонтанки, д. 27.*

[2] *Институт проблем машиноведения РАН. 199178, Санкт-Петербург, Большой проспект Васильевского острова, д. 61.*

[3] *МИРЭА — Российский технологический университет, 119454, Москва, проспект Вернадского, д. 78*

E-mail: [a]kiselev@pdmi.ras.ru, [b]a_plachenov@mail.ru

Аннотация: Дан обзор решений линейного волнового уравнения с тремя пространственными переменными, содержащих произвольные функции, привлекающих внимание исследователей с 18 века по настоящее время. Наш интерес к таким решениям мотивирован прежде всего проблематикой построения удобных выражений для описания локализованных волновых пучков и пакетов. Предметом исследований являются также недавно вошедшие в научный обиход волны, обладающие свойством однонаправленности. Рассмотрены четыре класса решений с произвольными функциями – относительно неискажающихся волн – и некоторые их приложения, в частности, в оптике. Во-первых, это классические плоские волны и их простые обобщения. Далее, это комплексифицированные сферические волны, известные как «поля комплексных источников», а также различные обобщения волны Бейтмена. Наконец, это недавно введенные в рассмотрение квазисферические волны.

Ключевые слова: Волновое уравнение, точные решения, относительно неискажающиеся волны, локализованные решения.

Solutions of the wave equation involving arbitrary functions

A.P. Kiselev[1,2,a], A.B. Plachenov[3,b]

[1] *St. Petersburg Department of V.A.Steklov Institute of Mathematics of RAS. St.Petersburg, Russia.*

[2] *Institute for Problems in Mechanical Engineering of RAS. St.Petersburg, Russia*

[3] *MIREA — Russian Technological University. Moscow, Russia*

E-mail: [a]kiselev@pdmi.ras.ru, [b]a_plachenov@mail.ru

Abstract: A review of solutions of the linear wave equation in three spatial variables, involving arbitrary functions is given. Our interest in such solutions is motivated primarily by the problem of constructing convenient expressions for describing localized wave beams and packets. Waves with the property of unidirectionality, which have recently entered scientific use, are also the subject of research. Four classes of solutions with arbitrary functions – relatively undistorted waves – and some of their applications, particularly in optics, are considered. First, these are classical plane waves and their simple generalizations. Next, these are complexified spherical waves, known as «complex source fields», as well as various generalizations of the Bateman wave. Finally, these are quasi-spherical waves, which have recently been introduced into consideration.

Keywords: Wave equation, exact solutions, relatively undistorted waves, localized solutions

PACS: 43.20.Bi, 02.30.Jr, 42.25.Fx

Введение

Доклад посвящен точным решениям линейного волнового уравнения с тремя пространственными переменными,

$$\Box u \equiv u_{xx} + u_{yy} + u_{zz} - \frac{1}{c^2} u_{tt} = 0, \qquad (1)$$

где $c = const > 0$ – скорость распространения волн. Решения уравнения (1), содержащие произвольные функции, привлекают внимание исследователей с 18 века по настоящее время. Наш интерес к таким решениям мотивирован прежде всего проблематикой построения удобных выражений для описания локализованных волновых пучков и пакетов.

В докладе рассказывается о специальных классах решений с произвольными функциями – относительно неискажающихся волнах – и о некоторых их приложениях. Дан обзор четырех классов таких решений. Во-первых, это классические плоские волны и их простые обобщения. Далее, это комплексифицированные сферические волны, которые часто называют «полями комплексных источников», а также различные обобщения волны Бейтмена. Наконец, это недавно введенные в рассмотрение квазисферические волны. В связи с ними обсуждается довольно новое понятие однонаправленных волн. Мы обращаем пристальное внимание на сингулярности рассматриваемых решений и случаи, когда решения локализованы.

Доклад основан на исследованиях, выполненных нами совместно с А.С. Благовещенским, Е.А. Злобиной, М.В. Перель, И.А. Со, А.М. Тагирджановым и П. Чаморро-Посадой.

1 Относительно неискажающиеся волны

Мы рассматриваем решения, являющиеся, по классической терминологии [1], *относительно неискажающимися волнами*, т.е. имеющие вид

$$u = g\, f(\theta), \tag{2}$$

где *форма волны* f – произвольная функция одной переменной, а *фаза* $\theta = \theta(x, y, z, t)$ и *амплитуда* $g = g(x, y, z, t)$ – фиксированные функции. Чтобы охватить важные примеры (см. п. 3), следует допустить выполнение уравнения (1) не во всем пространстве-времени $\mathbb{R}^3 \times \mathbb{R}$, а за исключением многообразия меньшей размерности [2]. Авторы [1], приведя в качестве примеров известные еще Д'Аламберу и Эйлеру плоские и сферические волны, не упомянули найденную к тому времени волну Бейтмена, модификации которой оказались впоследствии важны для моделирования сильно локализованных пучков и пакетов. Еще один класс относительно неискажающихся волн, который мы называем квазисферическими волнами, возник уже в нынешнем веке.

Мы, для определенности, выбираем в качестве преимущественного направления распространения волн ось *z*. Координату *z* будем называть продольной, а координаты *x* и *y* – поперечными.

2 Плоские волны

Классические плоские волны, называемые решениями Д'Аламбера, имеют вид

$$u = f(\theta),$$
$$\theta = z - ct,$$

где f – произвольная функция одного вещественного переменного. Они описывают волны, бегущие вдоль оси *z*. Здесь $g = 1$. С таким же успехом можно рассмотреть и волны с $\theta = z + ct$, бегущие в противоположную сторону. Такие решения, очевидно, есть у волнового уравнения с любым числом переменных.

Комплексификация, для которй требуется, чтобы число пространственных переменных было не менее двух,

$$\theta = \sqrt{1 - p^2}\, x + pz - ct,$$

где, например, $p > 1$, дает эванесцентные или неоднородные плоские волны. Теперь функция f должна быть аналитической. Следуя навеянной оптикой терминологии, эти решения можно назвать *фундаментальными модами*, а решения с $g \neq const$ – *высшими модами*. Легко проверить, что в качестве амплитуды можно взять любое решение уравнения Лапласа

$$g_{xx} + g_{yy} = 0.$$

Непостоянные решения этого уравнения растут на бесконечности. Решения, растущие в поперечном направлении линейно, встречались в теории дифракции. Например, в [3] изучалась дифракция на полубесконечном экране волны вида

$$u = xH(z - ct),$$

где

$$H(p) = \begin{cases} 1, & p \geq 0, \\ 0, & p < 0 \end{cases}$$

— ступенька Хевисайда.

3 Сферические волны

Классические расходящиеся сферические волны имеют вид

$$u = \frac{f(\theta)}{R}, \tag{3}$$

$$\theta = R - ct, R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}.$$

Такие решения есть только в трехмерном случае. Выражение (3) описывает поле точечного источника в начале координат:

$$\Box u = -4\pi\delta(x)\delta(y)\delta(z)\, f(-ct).$$

Высших мод, регулярных вне начала координат, не существует.

С целью построения решений, имеющих асимптотикой гауссовы пучки, в [4,5] произведена комплексификация сферических волн посредством комплексного сдвига вдоль оси z

$$z \mapsto z - ia,$$

где $a > 0$ – произвольный параметр. Тогда $R \mapsto R_* = \sqrt{x^2 + y^2 + (z - ia)^2}$. В гармоническом по времени режиме $f(R - ct) = e^{ik(R-ct)}$ (k – волновое число) при наивном разложении корня вблизи оси z легко получается

$$u = \frac{e^{i(kR_* - \omega t)}}{R_*} \approx \frac{1}{z - ia} e^{ik(z-ct) - ka\frac{x^2+y^2}{2\left(z^2+a^2\right)} + \ldots}, \tag{4}$$

где точками обозначены осциллирующие члены. Это – *гауссов пучок*, очень важный для оптики и возникавший ранее из приближенных построений (см., например, [6]). Отметим, что при $ka \gg 1$ решение имеет сильную локализацию в поперечных направлениях и быстро осциллирует в продольном.

Решение (4), вызвавшее большой интерес, получило название поля комплексного источника, поскольку подразумевалось, что источник в (3) при комплексификации переместился в комплексную область. Однако в вещественном пространстве комплексифицированное решение удовлетворяет уравнению вида

$$\Box u = F(x, y, z, t),$$

причем F – обобщенная функция, зависящая от f и сосредоточенная на двумерном многообразии (оно называется антенной), определяемом выбором квадратного корня в R_*.

Все антенны, которые могут быть как ограничены, так и неограничены, имеют краем окружность $\left\{z = 0, \sqrt{x^2 + y^2} = a\right\}$, на которой R_* обращается в нуль, а комплексифицированная сферическая волна в бесконечность. В частности, антенна может быть плоскостью с круглым вырезом, $\left\{z = 0, \sqrt{x^2 + y^2} \geq a\right\}$, или бесконечно тонким диском, $\left\{z = 0, \sqrt{x^2 + y^2} \leq a\right\}$. В первом случае, при надлежащем выборе формы волны f и при условии $ka \gg 1$, поле представляет собою гауссов пучок или волновой пакет, распространяющийся вблизи оси z. Во втором случае пучок или пакет излучается антенной преимущественно в направлении положительных z, а при $z < 0$ поле быстро затухает. Детальный обзор соответствующих результатов дан в [7].

4 Волна Бейтмена и ее модификация

4.1 Осесимметрическая фаза, фундаментальная мода

В начале 20 века Бейтмен установил инвариантность волнового уравнения относительно преобразования инверсии в метрике Минковского и, в качестве приложения, применил это преобразование к плоской волне [8]. Он получил решение, которое сейчас называется фундаментальной осесимметрической модой волны Бейтмена. Его удобно записать используя характеристические переменные

$$\alpha = z - ct, \quad \beta = z + ct,$$

в виде

$$u = \frac{1}{\beta} f(\theta), \tag{5}$$

где θ — осесимметрическая некомплексифицированная фаза Бейтмена

$$\theta = \alpha + \frac{x^2 + y^2}{\beta} = z - ct + \frac{x^2 + y^2}{z + ct}.$$

Аналогичные решения есть в любой пространственной размерности начиная с 2.

Бейтмена не интересовал вопрос о том, везде ли функция, имеющая сингулярнсти, удовлетворяет уравнению. Лишь недавно установлено, что для гладкой финитной формы волны это верно, хотя двумерный аналог является полем некоторого движущегося точечного источника [2]. Волна Бейтмена не привлекала внимания до 1990х годов, когда наметились приложения решений, возникающих в результате ее комплексификации

$$\beta \mapsto \beta_* = \beta - ia, \quad a > 0,$$

дающей решения

$$u = \frac{1}{\beta_*} f(\theta), \quad \theta = \alpha + \frac{x^2 + y^2}{\beta_*}. \tag{6}$$

Эти решения не имеют особенностей и удовлетворяют однородному уравнению (1) во всем пространстве-времени $\mathbb{R}^3 \times \mathbb{R}$. В [9] указано, что при выборе в комплексифицированном решении формы волны в виде

$$f(\theta) = e^{ik\theta} \tag{7}$$

(k – произвольный положительный параметр) возникает точное решение во всем пространстве, описывающее бегущий вдоль оси z пучок с гауссовской поперечной локализацией, а при некоторых других выборах f – другие известные на тот момент сильно локализованные волны. Это дало толчок к построению простых решений, описывающих волновые пакеты, гауссовски локализованные и в поперечном, и в продольном направлении. Например, удачным выбором является гауссовский волновой пакет с конечной энергией, в котором

$$f(\theta) = \exp\left\{2ka\left(1 - \sqrt{1 - i\theta/a}\right)\right\}.$$

Здесь ветвь корня выбрана так, что $\operatorname{Im}\sqrt{\ldots} \geq 0$. Такое решение быстро осциллирует, если $ka \gg 1$. При этом оно гауссовски локализовано возле бегущей точки $\alpha = 0$, $x = y = 0$, где $\theta = 0$. Его асимптотика вблизи пика получается разложением корня до квадратичных членов и имеет вид

$$u \approx \frac{1}{\beta_*} \exp(ik\psi) \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{\Delta_\perp^2}\right) \exp\left(-\frac{\alpha^2}{\Delta_\parallel^2}\right),$$

где поперечная и продольная длина $\Delta_\perp$ и $\Delta_\parallel$ равны соответственно

$$\Delta_\perp = \sqrt{\frac{\beta^2 + a^2}{ka}}, \quad \Delta_\parallel = 2\sqrt{\frac{a}{k}}.$$

Продольная длина здесь постоянна, см. [10].

4.2 Осесимметрическая фаза – высшие моды

Имея в виду построение интересных для оптики высших мод, т.е. решений вида

$$u = W \frac{f(\theta)}{\beta_*},$$

см. (6), введем переменные

$$X = \frac{x}{\beta_*}, \quad Y = \frac{y}{\beta_*}.$$

Если предположить, что модулирующий фактор W имеет вид

$$W = W(X, Y),$$

то в качестве W можно взять любое решение уравнения Лапласа

$$W_{XX} + W_{YY} = 0,$$

причем f произвольно. Такие u называются лапласовскими модами.

При специальной форме волны (7) можно найти модулирующий фактор вида

$$W = W(X, Y, \beta_*).$$

Для W получается уравнение

$$W_{XX} + W_{YY} + 4ik\beta_* W_{\beta_*} = 0.$$

Подстановкой $W = \exp\left(\frac{iK}{4k\beta_*}\right)\tilde{W}(X, Y)$ с произвольной константой K, оно сводится к уравнению Гельмгольца

$$\tilde{W}_{XX} + \tilde{W}_{YY} + K^2\tilde{W} = 0.$$

Мы получаем гельмгольцевские моды

$$u = \frac{1}{\beta_*}\exp\left(ik\theta + \frac{iK^2}{4k\beta_*}\right)\tilde{W}(X, Y).$$

Содержательные примеры лапласовских и гельмгольцевских мод обсуждаются, например, в [6].

4.3 Астигматическая фаза

Волну Бейтмена (5) можно обобщить, введя в фазу завсисимость от поперечных координат посредством квадратичной формы (зависящей от β). Такая фаза, по оптической терминологии, называется астигматической, см. [11].

Пусть $\mathbf{r} = (x, y)^{\mathrm{T}}$ (^{T} – транспонирование), $\mathbf{\Gamma} = \mathbf{\Gamma}(\beta)$ – симметричная матрица 2×2 с положительной мнимой частью, $\mathrm{Im}\mathbf{\Gamma} > 0$, удовлетворяющая уравнению

$$\mathbf{\Gamma}_\beta + \mathbf{\Gamma}^2 = 0.$$

В осесимметрическом случае матрица $\mathbf{\Gamma}$, с точностью до множителя β_*^{-1} – единичная.

Выражение вида (2) с

$$\theta = \alpha + \mathbf{r}^{\mathrm{T}}\mathbf{\Gamma}(\beta)\mathbf{r} \tag{8}$$

и

$$g = \sqrt{\det \mathbf{\Gamma}(\beta)} \tag{9}$$

является относительно неискажающейся волной, обобщающей волну Бейтмена (6), см. [11]. Оно называется комплексифицированной астигматической фундаментальной модой волны

Бейтмена. Выражение (2), (8), (9) не имеет особенностей. Оно обобщается на случай любой размерности, начиная с 2.

5 Квазисферические волны

5.1 Представление в виде (2)

Относительно неискажающиеся волны, которые мы называем квазисферическими волнами, начали рассматриваться только в текущем тысячелетии. Они имеют вид

$$u = \frac{f(\theta)}{S}, \tag{10}$$

где

$$\theta = S - z - ib, \tag{11}$$

а S задается выражением

$$S = \sqrt{(ct+ib)^2 - r^2}. \tag{12}$$

Здесь $r = \sqrt{x^2+y^2}$, а $b > 0$ – свободный параметры. Квадратный корень можно понимать любым образом. Такие решения появились впервые, по-видимому, в [12].

В [13] отмечено что эти решения получается из сферических волн с помощью преобразования

$$z \mapsto i(ct+ib), \quad ct \mapsto i(z+ib).$$

Высшие моды для решения (10) построены в работе [14].

5.2 Однонаправленность

Одной из причин интереса к решениям (10)–(12) является их однонаправленность вдоль оси z. Это означает, см., например, [13], что в разложении решения по плоским волнам присутствуют только однородные плоские волны

$$e^{i(\omega t - k_x x - k_y y - k_z z)}, \quad k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = \frac{\omega^2}{c^2},$$

бегущие в направлениях, составляющих с осью z угол, не превосходящий $\pi/2$,

$$u(x,y,z,t,) = \int_{-\infty}^{+\infty} dk_x \int_{-\infty}^{+\infty} dk_y \int_0^{+\infty} \tilde{u}(\mathbf{k}) e^{i[\omega t - k_z z - k_x x - k_y y]} dk_z \tag{13}$$

$$= \iiint_{\mathbb{R}^3} H(k_z) \tilde{u}(\mathbf{k}) e^{i[\omega t - k_z z - k_x x - k_y y]} d^3\mathbf{k}, \tag{14}$$

где $\tilde{u}$ – некоторая плотность, а H – ступенька Хевисайда.

Это свойство выражает естественное с физической точки зрения требование, чтобы математическая модель импульса описывала его распространение строго от источника. Для осевой симметрии представление (13)-(14) сводится к разложению по цилиндрическим волнам:

$$u(t,r,z)=\int_0^{\infty}d\omega\int_0^{\omega/c}dk_z\,A(k_z,\omega)e^{i(\omega t-k_z z)}J_0\left(r\sqrt{\omega^2/c^2-k_z^2}\right),$$

где J_0 – функция Бесселя. Связь между функциями $\tilde{u}$, A и f изучена в работе [13].

Внимание к однонаправленным решениям было привлечено работой [15].

5.3 Моделирование малоцикловых импульсов

Побудительным мотивом для изучения квазисферических волн явились успехи в генерации малоцикловых лазерных импульсов – таких, для которых вещественная и мнимая части соответствующего комплексного решения меняют знак один-два раза.

Простейший малоцикловый квазисферический импульс, обладающий конечной энергией, найден в [16] элементарным способом, не использующим представлений (13)-(14), и имеет вид

$$u=\frac{1}{(S-z-i\zeta)S},\qquad(15)$$

где ζ – вещественный свободный параметр. Решение не имеет сингулярностей, если

$$\zeta<b.$$

При разных соотношениях между свободными параметрами функция (15) описывает импульсы разного вида. Если b и ζ близки, то импульс похож на блин, а при $|\zeta|\ll|b|$ – на мячик. Если знаки ζ и b различны, причем $|\zeta|\gg|b|$, то форма импульса в фокальной области напоминает иглу, см. [16].

Заключение

Относительно неискажающиеся волны за три столетия их изучения нашли разнообразные приложения как в математике, так и в разделах физики, касающихся волновых явлений. Исследование относительно неискажающихся волн продолжается.

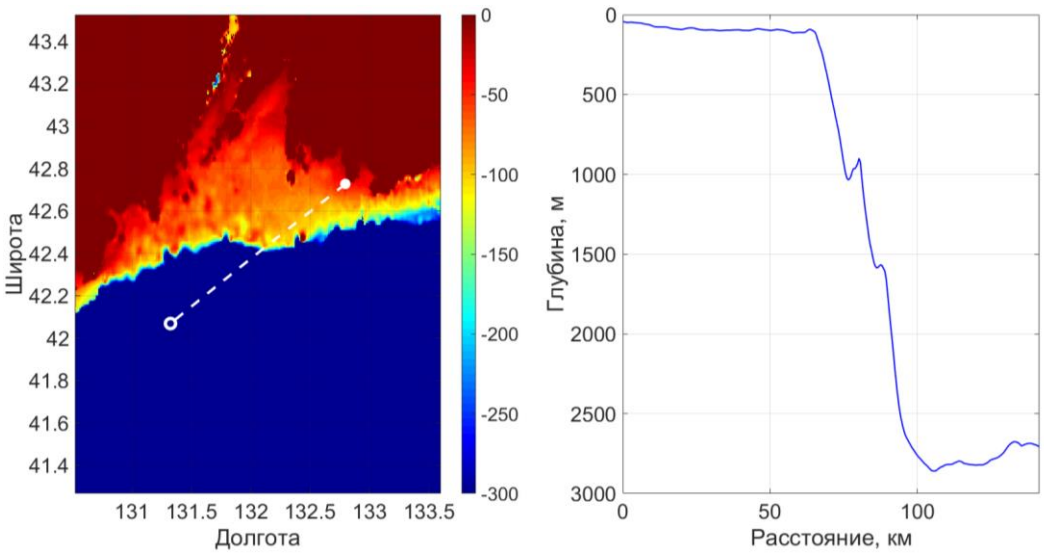
Список литературы

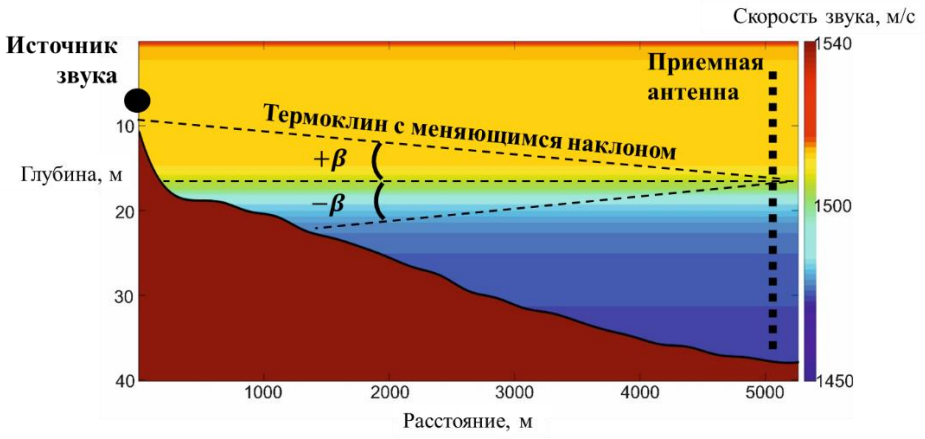
1. *Курант Р., Гильберт Д.* Методы математической физики. Гостехиздат. М., 1941.
2. *Благовещенский А.С., Злобина Е.А., Киселев А.П.* Двумерные аналоги классической волны Бейтмена – решения задач с движущимися источниками // Дифф. Уравнения. 2022. **58**, № 2. С. 270.
3. *Коузов Д.П., Соловьева Ю.А.* Дифракция на полубесконечном экране плоской нестационарной волны, амплитуда которой линейно нарастает вдоль фронта // Зап. Научн. Семин. ПОМИ. 2007. **142**. С. 138.
4. *Изместьев А.А.* Однопараметрические волновые пучки в свободном пространстве // Изв. вузов. Радиофиз. 1970. **13**, № 9. С. 1380.

5. *Deschamps G.A.* Gaussian beam as a bundle of complex rays // Electron. Lett. 1971. **7**, N 23. P. 684.
6. *Киселев А.П.* Локализованные световые волны: параксиальные и точные решения волнового уравнения (обзор) // Опт. Спектр. 2007. **102**, № 4. С. 661.
7. *Тагирджанов А.М., Киселев А.П.* Комплексифицированные сферические волны и их источники. Обзор // Опт. Спектр. 2015. **119**, № 2. С. 271.
8. *Bateman H.* The conformal transformations of a space of four dimensions and their applications to geometrical optics // Proc. London Math. Soc. 1909. **7**. 70.
9. *Hillion P.* Generalized phases and nondispersive waves // Acta Appl. Math. 1993. **30**, N 1. P. 35.
10. *Kiselev A.P., Perel M.V.* Highly localized solutions of the wave equation // J. Math. Phys. 2000. **41**, N 4. P. 1934.
11. *Kiselev A.P., Plachenov A.B., Chamorro-Posada P.* Nonparaxial wave beams and packets with general astigmatism // Phys. Rev. A. 2012. **8**, N 4. Pap. 043835.
12. *Parker K.J., Alonso M.A.* Longitudinal iso-phase condition and needle pulses // Opt. Express. 2016. **24**, N 15. P. 2866.
13. *Плаченов А.Б., Киселев А.П.* Однонаправленные импульсы: относительно неискажающиеся квазисферические волны, интегралы Фурье-Бесселя и разложения по плоским волнам // Опт. Спектр. 2024. **132**, № 4. С. 429.
14. *Besieris I., Saari P.* Energy backflow in unidirectional spatiotemporally localized wave packets // Phys. Rev. A. 2023. **107**, N 3. Pap. 033502.
15. *Zamboni-Rached M.* Unidirectional decomposition method for obtaining exact localized wave solutions totally free of backward components // Phys. Rev. A. 2009. **79**, N 1. Pap. 013816.
16. *So I.A., Plachenov A.B., Kiselev A.P.* Simple unidirectional finite-energy pulses // Phys. Rev. A. 2020. **102**, N 6. Pap. 063529.

Назад к содержанию секции

СЕКЦИЯ АКУСТИКА ОКЕАНА И ГИДРОАКУСТИКА





назад к Содержанию

СОДЕРЖАНИЕ СЕКЦИИ АКУСТИКА ОКЕАНА И ГИДРОАКУСТИКА

1. МОДОВАЯ СТРУКТУРА ШИРОКОПОЛОСНОГО ЗВУКОВОГО ПОЛЯ В КЛИНОВИДНОМ ВОЛНОВОДЕ С ВНУТРЕННИМИ ВОЛНАМИ
Луньков А.А., Шерменева М.А., Ужанский Э.М., Кацнельсон Б.Г. 42

2. ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ШЕЛЬФОВЫХ И ГЛУБОКОВОДНЫХ УЧАСТКОВ МОРЕЙ МИРОВОГО ОКЕАНА ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ МЕСТ ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ
Косарев Г.В. 48

3. ОПЫТ СЕЙСМИЧЕСКИХ РАБОТ С АВТОНОМНОЙ СЕКЦИОННОЙ ДОННОЙ СЕЙСМОКОСОЙ В ОБСКОЙ ГУБЕ В 2025 ГОДУ
Корольков З.А., Лесонен Д.Н., Ларичев В.А., Смирнов В.А., Максимов Г.А. 54

4. ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЕН ПРИХОДА ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ ИЗ МЕЛКОГО МОРЯ В ГЛУБОКИЙ ОКЕАН В ВОЛНОВОДАХ ЯПОНСКОГО МОРЯ
Сорокин М.А., Ткаченко П.Д., Сокиркина Д.В., Шкрамада С.С. 55

5. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НОРМАЛЬНЫХ МОД И КВАЗИМОД В МЕЛКОВОДНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДАХ
Григорьев В.А. 61

6. СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЗОЛНОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ НИЗКОЧАСТОТНОГО ЗВУКА, РАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ В МЕЛКОМ МОРЕ
Гулин О.Э., Ярощук И.О. 67

7. О ВЛИЯНИИ СОЛИТОНОПОДОБНЫХ ВНУТРЕННИХ ВОЛН НА ТОЧНОСТЬ АКУСТИЧЕСКОЙ ДАЛЬНОМЕТРИИ В МЕЛКОВОДНОЙ ЧАСТИ КАРСКОГО МОРЯ
Назаренко Ю.В., Сидоров Д.Д., Луньков А.А., Петников В.Г. 73

8. ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ МОДОВОЙ СТРУКТУРЫ ШИРОКОПОЛОСНОГО ЗВУКОВОГО ПОЛЯ В МЕЛКОМ МОРЕ ПРИ НАЛИЧИИ ТЕРМОКЛИНА И НЕРОВНОСТЕЙ ДНА
Сидоров Д.Д., Шепель И.А., Шерменева М.А., Луньков А.А. 79

9. НЕКОТОРЫЕ ОЦЕНКИ ПРИПОВЕРХНОСТНОГО ЗВУКОВОГО КАНАЛА ПО ДАННЫМ ЭЛЕКТРОННЫХ РЕСУРСОВ
Львов К.П., Цыбин В.С. 85

10. ТРАНСФОРМАЦИЯ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ В НЕРЕГУЛЯРНОМ ГЕОАКУСТИЧЕСКОМ ВОЛНОВОДЕ С ВОДОПОДОБНЫМ УЧАСТКОМ ДНА
Манульчев Д.С., Сидоров Д.Д., Луньков А.А. 91

11. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗВУКА В МОРСКОМ ВОЛНОВОДЕ С РЕЗКИМ ИЗМЕНЕНИЕМ РЕЛЬЕФА ДНА
Папкова Ю.И. 97

12. ВЛИЯНИЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА ГРУППОВЫЕ СКОРОСТИ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ В СЦЕНАРИИ «ШЕЛЬФ-ГЛУБОКИЙ ОКЕАН» В ВОЛНОВОДАХ ЯПОНСКОГО МОРЯ
Ткаченко П.Д., Сорокин М.А. 105

13. ИЗГИБНЫЕ КОЛЕБАНИЯ БАЛКИ В ЖИДКОСТИ
Косарев О.И., Пузакина А.К. 111

14. ПРИМЕНЕНИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ «АВТОПРОИЗВЕДЕНИЕ» ПРИ ОБРАБОТКЕ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ РАЗРЕЖЕННОЙ РЕШЕТКОЙ В АКУСТИЧЕСКОМ ВОЛНОВОДЕ
Вировлянский А.Л., Казарова А.Ю.....117

15. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В ДЕЦИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ: ПОИСК ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ
Салин М.Б., Ермошкин А.В., Костев Д.А., Разумов Д.Д. 123

16. ВЛИЯНИЕ ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОБРАБОТКИ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПАРАМЕТРОВ ОКЕАНИЧЕСКОГО ВОЛНОВОДА
Раевский М.А., Бурдуковская В.Г. 124

17. ИНТЕГРИРОВАННАЯ НАВИГАЦИОННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ МОРСКОЙ 3D СЕЙСМОРАЗВЕДКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БУКСИРУЕМЫХ СЕЙСМОКОС. РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ НА РЕАЛЬНЫХ ДАННЫХ
Ларичев В.А., Смирнов В.А., Корольков З.А., Максимов Г.А. 130

18. СТАТИСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО ШУМОВОГО ФОНА МЕЛКОВОДНЫХ ПРИБРЕЖНЫХ АКВАТОРИЙ
Горовой С.В.....131

19. ПРОБЛЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПОДВОДНОГО ШУМА ГРАЖДАНСКИХ СУДОВ В УСЛОВИЯХ АРКТИКИ
Остроумова П.Л., Пальникова О.В., Розанов М.И. 138

20. ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ СРЕДСТВ ЗВУКОПОДВОДНОЙ СВЯЗИ
Скорынин А.А., Крестовских Д.А., Чекмарев М.В., Григас С.Э. 144

21. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ПЕЛЕНГОВАНИЯ В ГЛУБОКОМ МОРЕ
Аксенов С.П., Кузнецов Г.Н. 150

22. ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНВАРИАНТА ЧУПРОВА В ВЕКТОРНО-СКАЛЯРНЫХ ПОЛЯХ МУЛЬТИПОЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ В МЕЛКОМ МОРЕ
Кузнецов Г.Н., Степанов А.Н. 156

23. ФАЗОВЫЙ ИНВАРИАНТ И ЛИНИИ РАВНЫХ ФАЗ В ЗВУКОВОМ ПОЛЕ ГЛУБОКОГО МОРЯ
Кузнецов Г.Н., Степанов А.Н. 162

24. ОСОБЕННОСТИ ШИРОТНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ КАВИТАЦИОННЫХ ПОРОГОВ МОРСКОЙ ВОДЫ В ИНДИЙСКОМ ОКЕАНЕ
Мельников Н.П. 168

25. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ КОМБИНИРОВАННОГО ПРИЕМНИКА С ПОМОЩЬЮ ГЛАЙДЕРА
Злобина Н.В., Касаткин С.Б. **174**

26. ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИЕМНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОСВЕЩЕНИЯ ПОДВОДНОЙ ОБСТАНОВКИ
Злобина Н.В., Касаткин С.Б. **180**

27. ОБОСНОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК ФАЗО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИНВАРИАНТА В ГЛУБОКОМ МОРЕ
Аксенов С.П., Кузнецов Г.Н. **186**

28. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ АРХИТЕКТУР НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ЗАДАЧ КЛАССИФИКАЦИИ ОБЪЕКТОВ РЕЧНОГО СУДОХОДСТВА
Поляков А.С., Травин Р.В. **192**

29. СТАТИСТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНИВАНИЮ КООРДИНАТ УДАЛЕННОГО АКУСТИЧЕСКОГО ИСТОЧНИКА В КАНАЛЕ МЕЛКОГО МОРЕ
Малеханов А.И., Смирнов А.В. **199**

30. ВЛИЯНИЕ УРОВНЯ ДЕТАЛИЗАЦИИ ДНА НА ПОГРЕШНОСТЬ ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА МЕТОДОМ НОРМАЛЬНЫХ МОД В НЕОДНОРОДНОМ ПО ДАЛЬНОСТИ ВОЛНОВОДЕ
Тарасов Д.А., Горелик Е.Д., Линник В.Н., Алексеева О.М., Скорынин А.А. **206**

31. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ДИСТАНЦИОННОЙ ПОДСТРОЙКИ ИНТЕРФЕРОМЕТРА
Громашева О.С., Плюта Д.В., Чупин В.А. **212**

32. АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИЗЛУЧАТЕЛЯ НА ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ
Британков А.К., Травин Р.В. **220**

33. ВЛИЯНИЕ НЕОДНОРОДНОЙ СТРУКТУРЫ ДНА, СТРАТИФИКАЦИИ ВОДНОГО СЛОЯ И ПОВЕРХНОСТНОГО ВОЛНЕНИЯ НА ЗВУКОВЫЕ ПОЛЯ ШУМОВЫХ ИСТОЧНИКОВ В МЕЛКОВОДНЫХ АКВАТОРИЯХ КАРСКОГО МОРЯ
Боджона С.Д., Сидоров Д.Д., Назаренко Ю.В., Луньков А.А., Кабатченко И.М., Фомин В.В. **226**

УДК: 534.873 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39436

Модовая структура широкополосного звукового поля в клиновидном волноводе с внутренними волнами

А.А. Луньков[1,a], М.А. Шерменева[1,b], Э.М. Ужанский[2,c], Б.Г. Кацнельсон[2,d]

[1] *Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, ул. Вавилова 38, Москва, 119991 Россия*

[2] *Dr. Moses Strauss Department of Marine Geosciences, L. Charney School of Marine Sciences, University of Haifa, Haifa, Israel*

E-mail: [a]lunkov@kapella.gpi.ru, [b]shermeneva@mail.ru, [c]ernstuzhansky@gmail.com, [d]bkatsnels@univ.haifa.ac.il

Аналитически, в рамках численного моделирования, а также в ходе натурного эксперимента в озере Кинерет (Израиль) изучено распространение широкополосного (0.2-2.0 кГц) звукового сигнала в клиновидном волноводе с внутренней волной Кельвина, которая приводила к изменению угла наклона термоклина. Источник располагался в прибрежной области в полностью перемешанном слое, приёмная вертикальная антенна – на удалении 5 км в сторону увеличения глубины в слое со стратификацией. Основное внимание уделено анализу формирования и эволюции частотных зависимостей модовых амплитуд звукового поля, которые выделялись на вертикальной антенне. Показано, что вследствие межмодового взаимодействия, амплитуды мод осциллируют в частотной области, а период осцилляций однозначно зависит от расстояния между источником звука и точкой, где термоклин касается дна. Осцилляции, отвечающие первой и второй моде, происходили в противофазе. В случае суммирования комплексных амплитуд первых двух мод наблюдались специфические частотные смещения, которые характерны только для указанного вида возмущения.

Ключевые слова: акустика мелкого моря, клиновидный волновод, внутренняя волна, широкополосный сигнал, нормальные волны (моды), межмодовое взаимодействие

Mode structure of a broadband sound field in a wedge-shaped waveguide with internal waves

A.A. Lunkov[1,a], M.A. Shermeneva[1,b], E.M. Uzhansky[2,c], B.G. Katsnelson[2,d]

[1] *Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences. Moscow 119991, Russia*

[2] *Dr. Moses Strauss Department of Marine Geosciences, L. Charney School of Marine Sciences, University of Haifa, Haifa, Israel*

E-mail: [a]lunkov@kapella.gpi.ru, [b]shermeneva@mail.ru, [c]ernstuzhansky@gmail.com, [d]bkatsnels@univ.haifa.ac.il

The propagation of a broadband (0.2-2.0 kHz) sound signal in a wedge-shaped waveguide with an internal Kelvin wave, which caused a change in the thermocline inclination angle, was studied analytically, using numerical modeling, and a field experiment in Lake Kinneret (Israel). The sound source was in the coastal region in a fully mixed layer, and the receiving vertical array was located 5 km away in a deeper, stratified layer. The primary focus was on analyzing the formation and evolution of the frequency dependences of the modal amplitudes of the sound field, which were extracted at the vertical array. It was shown that, due to mode coupling, the mode amplitudes oscillate in the frequency domain, and the oscillation period unambiguously depends on the distance between the sound source and the point where the thermocline touches the bottom. Oscillations corresponding to the first and second modes occurred in antiphase. In the case of summing the complex amplitudes of the first two modes, specific frequency shifts were observed, which are characteristic only of the specified type of disturbance.

Keywords: shallow water acoustics**,** wedge-shaped waveguide, internal wave, broadband signal, normal modes, mode coupling

PACS: 43.30. –k, 43.30 +m

Введение

Изучение влияния пространственно-временных неоднородностей на формирование широкополосных звуковых полей в мелководных акваториях представляется не только актуальной научной, но и важной практической задачей [1]. Особый интерес представляют ситуации, когда в среде одновременно присутствуют неоднородности различного типа. В настоящей работе изучается распространение звука в акватории озера Кинерет, где наблюдается как неравномерная батиметрия (наклон дна), так и меняющаяся со временем и в пространстве стратификация водного слоя (Рис. 1). Источником пространственно-временной изменчивости является главным образом внутренняя волна Кельвина, движущаяся против часовой стрелки и приводящая к изменению наклона термоклина на трассе между центром озера и прибрежной областью [2]. Нахождение закономерностей, связывающих характеристики полного звукового поля и характеристики возмущений, часто сопряжено с

непреодолимыми трудностями из-за необходимости учёта интерференционных эффектов. Для упрощения этой задачи целесообразно выделять и анализировать отдельные составляющие звукового поля, например, волноводные моды [3]. Настоящая работа посвящена аналитическому, численному и экспериментальному изучение частотных зависимостей модовых амплитуд в условиях пространственно-временной изменчивости озера Кинерет.

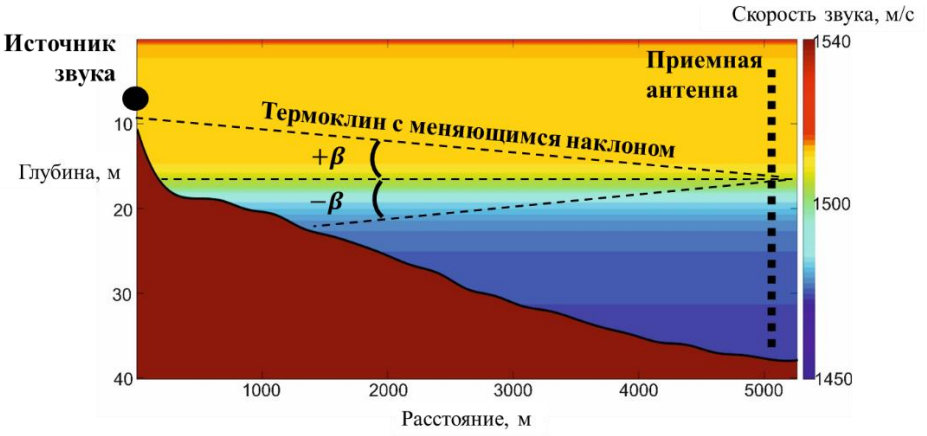


Рис. 1. Клиновидный волновод озера Кинерет с указанием расположения источника звука и приёмной антенны. Цветом отмечено распределение скорости звука при горизонтальном положении термоклина. Штриховыми линиями отмечены границы вариации наклона термоклина под действием внутренней волны Кельвина.

1 Аналитическое описание

При наличии плавных возмущений в мелководном волноводе комплексной амплитуды звукового поля $p(\omega, r, z)$ может быть представлена в виде суммы взаимодействующих мод [3]:

$$p(\omega, r, z) = \frac{1}{\sqrt{r}} \sum_m C_m(\omega, r) \Psi_m(\omega, r, z) \frac{e^{i \int_0^r q_m(\omega, r') dr'}}{\sqrt{q_m(\omega, r)}} \quad (1)$$

где $C_m(\omega, r)$– модальные коэффициенты возбуждения, $\Psi_m(\omega, r, z)$ и $\xi_m(\omega, r) = q_m(\omega, r) + i\gamma_m(\omega, r)/2$ – вертикальные профили и постоянные распространения мод, соответственно. Коэффициенты C_m определяются из решения системы M дифференциальных уравнений

$$\frac{dC_m}{dr} = -\frac{\gamma_m(\omega, r)}{2} C_m + \sum_{n \neq m}^{M} B_{nm}(\omega, r) C_n e^{i \int_0^r \Delta q_{nm}(\omega, r\prime) dr'} \quad (2)$$

с начальными условиями $C_m(\omega, 0) = \Psi_m(\omega, 0, z_s)$. Здесь B_{nm} – коэффициенты межмодового взаимодействия, z_s – глубина источника звука, $\Delta q_{nm} = q_n - q_m$.

Взаимодействием мод наиболее выражено в области между источником ($r = 0$) и точкой ($r = r_{th}$), где термоклин касается дна. Интегрирование (2) на интервале $(0; r_{th})$ с учётом плавности изменения B_{nm} и C_n даёт приближённое решение для расстояния $r \geq r_{th}$:

$$C_m(\omega, r) \approx C_m(\omega, 0) e^{-\int_0^{r_{th}} \gamma_m(\omega, r) dr/2} + \quad (3)$$

$$+\sum_{n\neq m}^{M}\bar{B}_{nm}(\omega,r_{th})C_n(\omega,0)e^{-\int_0^{r_{th}}\gamma_n(\omega,r)dr/2}\frac{i\left(1-e^{i\int_0^{r_{th}}\Delta q_{nm}(\omega,r\prime)dr'}\right)}{\Delta q_{nm}(\omega,r_{th})}$$

Выражение под знаком суммы определяет осцилляции модовых амплитуд $|A_m| = |C_m|/\sqrt{q_m r_{th}}$ вдоль частотной оси. Период этих осцилляций зависит от расстояния r_{th}, на котором термоклин касается дна. Под действием внутренней волны Кельвина точка касания смещается, что вызывает изменение периода.

2 Численного моделирование

Акустическое поле $p(\omega,r,z)$ в волноводе (Рис. 1) вычисляется методом широкоугольного параболического уравнения (RAM [5]) в полосе частот 0.2-2.0 кГц. Дно – однородное со скоростью звука 350 м/с и плотностью 1.3 г/см3. Углы наклона термоклина β лежат в диапазоне $\pm 0.1°$. Для выделения амплитуд отдельных мод A_m выполняется интегрирование

$$A_m(\omega,r) \approx \int_0^H p(\omega,r,z)\Psi_m(\omega,r,z)dz \qquad (4)$$

Расчет профилей мод $\Psi_m(\omega,r,z)$ осуществляется с помощью программы KRAKENC [6].

Абсолютные значения амплитуд $|A_m|$ первых четырёх мод на расстоянии $r = 5$ км от источника, помещённого на глубине $z_s = 7$ м, в зависимости от угла наклона термоклина и частоты показаны на Рис. 2. Хорошо видно, что изменение угла наклона приводит к

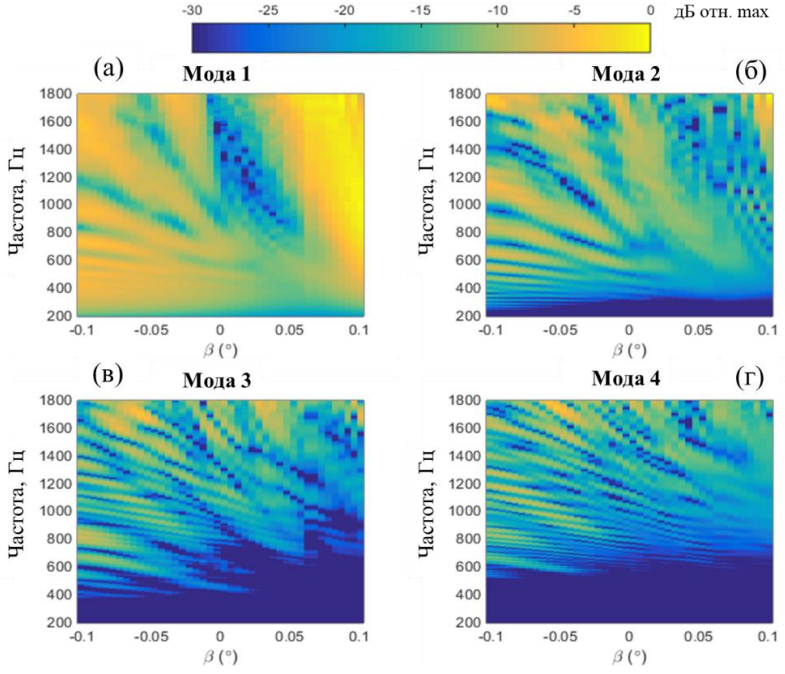


Рис. 2. Зависимость модовой амплитуды $|A_m|$ от частоты f и угла наклона термоклина β для первых четырёх мод.

изменению периода осцилляций вдоль частотной оси. Для мод 1 и 2 осцилляции находятся в противофазе – локальные минимумы одной моды соответствуют локальным максимумам

другой, что подчёркивает их взаимодействие. При суммировании модовых пар (Рис. 3) наблюдаются специфические частотные смещения интерференционных максимумов. Причём для первых двух мод эти смещения являются разнонаправленными (отмечены белыми стрелками): с ростом угла наклона термоклина на низких частотах происходит смещение в сторону увеличения частоты звука, на высоких – в сторону уменьшения.

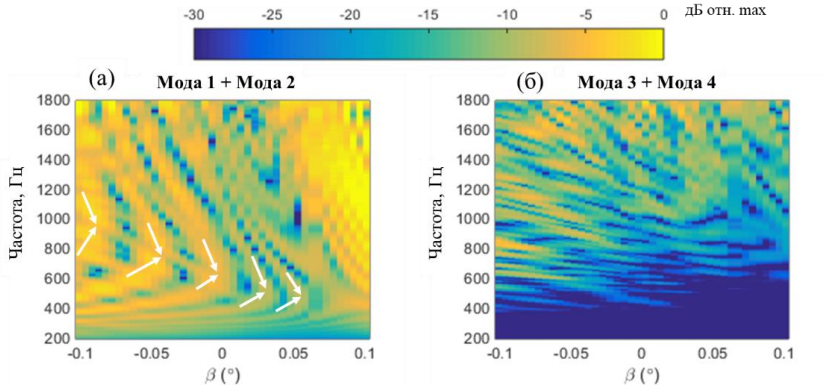


Рис. 3. Зависимость суммы модовых амплитуд (а) – $|A_1 + A_2|$ и (б) – $|A_3 + A_4|$ от частоты f и угла наклона термоклина β для первых четырёх мод.

3 Экспериментальные данные

Натурный эксперимент, соответствующий схеме на Рис. 1, был проведен в озере Кинерет 11-12 августа 2021 года. Результаты выделения первых двух мод на вертикальной антенне показаны на Рис. 4 за всё время эксперимента. Как и при численном моделировании обращают

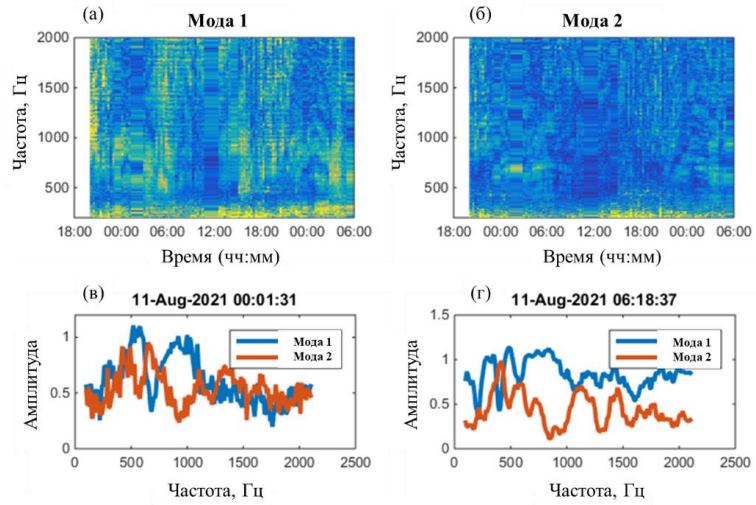


Рис. 4. Частотные зависимости амплитуд первой и второй моды, $|A_1|$ и $|A_2|$: (а), (б) – изменение со временем, (в), (г) – для двух моментов времени. Время (UTC+3) соответствует дням 11-12 августа 2021 года.

на себя внимание противофазные осцилляции модовых амплитуд вдоль частотной оси, характер которых меняется со временем под действием внутренней волны Кельвина. Период этой волны составляет 24 часа. Интерференционная структура звукового поля первых двух мод в координатах время-частота представлена на Рис. 5. В области временных осечек 00:00

наблюдаются разнонаправленные частотные смещения и формируются кольцевые интерференционные полосы.

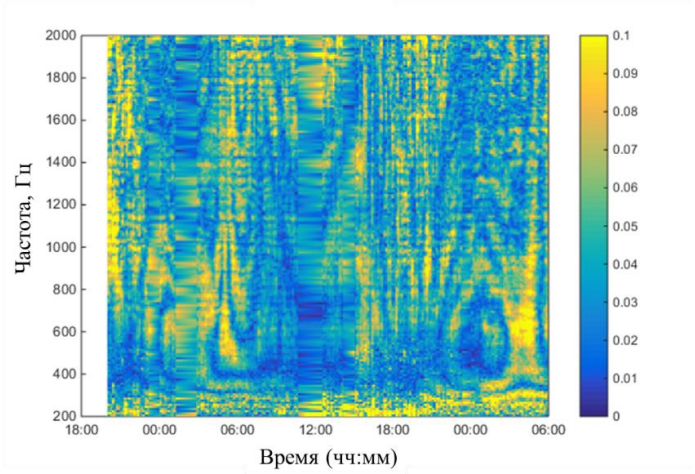


Рис. 5. Изменение со временем частотной зависимости суммы амплитуд первой и второй моды, $|A_1 + A_2|$. Время (UTC+3) соответствует дням 11-12 августа 2021 года.

Заключение

Основные особенности модовой структура звукового поля в прибрежном клине с переменным наклоном термоклина: 1) на частотно-временных(угловых) диаграммах амплитуд наблюдаются характерные полосчатые структуры для отдельных мод и пар мод; 2) вариации амплитуд первой и второй моды происходят в противофазе; 3) знак частотного сдвига интерференционной структуры первых двух мод зависит от частотного диапазона.

Источник финансирования. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-72-10121-П.
https://rscf.ru/project/tuwTgU_rZlAQgbw5qs4GO7HjoVGeB9Ey_47DIsK4P65iauZqCshq8wKpUqoAnuRpnm7mAfZju7s~/.

Список литературы

1. *Katsnelson B., Petnikov V., Lynch J.* Fundamentals of Shallow Water Acoustics. Springer, N.Y., 2012.
2. *Antenucci J.P., Imberger J., Saggio A.* Seasonal evolution of the basin-scale internal wave field in a large stratified lake. // Limnol Oceanogr. 2000. **45**, N 7. P. 1621–1638.
3. *Луньков А.А., Шерменева М.А.* Оценка расстояния до сосредоточенной неоднородности на акустической трассе в мелком море при наличии фоновых возмущений. // Акуст. журн. 2024. **70**, № 4. С. 566-581.
4. *Jiang Y., Zhang Q., Katsnelson B.* Mode coupling in a coastal wedge due to quasi-crossing of range-dependent modal eigenvalues. // JASA Express Lett. 2023. **3**, N 1. P. 016001.
5. *Collins M. D., Westwood E. K.* A Higher-Order Parabolic Equation for Underwater Sound Propagation. // J. Acoust. Soc. Am. 1991. **89**, N. 3. P. 1068–1075.
6. *Porter M.* The KRAKEN normal mode program. SACLANTGEN, La Spezia, Italy, 1991.

УДК: 534.6, 534.23 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39437

Гидроакустические исследования шельфовых и глубоководных участков морей мирового океана для выявления мест выбросов парниковых газов

Г.В. Косарев

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток. Россия, 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, д.5а.

E-mail: gor@marine.febras.ru

В докладе представлены экспериментальные данные, полученные при гидроакустических исследованиях шельфовых и глубоководных участков морей Мирового океана, с целью выявления мест интенсивных выбросов парниковых газов (двуокиси углерода и метана) из морских осадков. Это позволяет: выявить зоны скопления газа; изучить взаимосвязь выделения газа с распределением активных разломов земной коры, землетрясениями, деградацией подводной мерзлоты; прогнозировать расположение зон, потенциально опасных в плане выбросов метана. Эти работы проводились с использованием акустического профилографа с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) и гидролокатора бокового обзора (ГБО), разработанных в Институте проблем морских технологий (ИПМТ) ДВО РАН, в составе автономных подводных аппаратов и буксируемых носителях. Такие исследования могут быть полезны, как для поиска нефтегазоносных месторождений, так и изучения влияние выделения газа на изменения климата на планете.

Ключевые слова: акустический профилограф, гидролокатор бокового обзора, метан, газовые факелы, покмарки

Hydroacoustic studies of offshore and deep-sea areas of the world ocean to identify greenhouse gas emission sites

G.V. Kosarev

M.D. Ageev Institute of Marine Technology Problems of the Far-Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences Vladivostok, Russia. 5a, *Sukhanov Str., Vladivostok, 690950, Russia.*

E-mail: gor@marine.febras.ru

Abstract: The report presents experimental data obtained during hydroacoustic studies of shelf and deep-water zones of the seas of the World Ocean, with the aim of identifying places of intense gas emissions from

marine sediments. This allows: to identify methane accumulation zones; to study the relationship between gas emission and the distribution of active crustal faults, earthquakes, and underwater permafrost degradation; to predict the location of zones that are potentially hazardous in terms of methane emissions. These works were carried out using an acoustic profiler with linear frequency modulation and a side scan sonar, developed at the Institute of Marine Technology Problems of the Far Eastern Branch of the Russian Academy, as part of autonomous underwater vehicles and towed carriers. Such studies can be useful both for searching for oil and gas deposits and for studying the impact of gas release on climate change on the planet.
Keyword: profiler, side-scan sonar, methane, gas flares, pockmarks.

Введение

Климатические изменения, которые происходят в настоящее время на земном шаре и выражаются в повышении среднегодовой температуры воздуха и интенсивности атмосферной циркуляции, таянии мерзлоты и горных ледников, увеличении масштабов береговой эрозии и стока рек, запускают процессы увеличения эмиссии парниковых газов двуокиси углерода и метана из различных экосистем и усилению эффекта глобального потепления. Изучение динамики последствий глобальных изменений невозможно без разработки методов и способов диагностики, направленных на качественную и количественную оценку основных компонентов углеродного цикла, с этой целью необходимо проведение комплексных исследований: биохимических, геодезических и сейсмических исследований. Газ выходит из донной поверхности или с подповерхностный слоев в виде так называемых факелов сгустков пузырьков газа, поднимающихся к поверхности. Пузырьковый транспорт – наиболее эффективный механизм доставки метана из донных осадков в водную толщу и атмосферу [1]. Метан является эффективным парниковым газом, вклад которого в глобальное потепление не уклонно растет.

Акустические методы, основанные на генерации акустического импульса и приеме рассеянного акустического сигнала, являются эффективными для наблюдения за всплывающими пузырьками и получения оценок количества метана, доставляемого ими в воду и атмосферу. Кроме того, данные методы позволяют дистанционно, с помощью штатных или специализированных судовых эхолотов и гидролокаторов (акустических профилографов и гидролокаторов бокового обзора), обнаружить всплывающие пузырьки. При выходе газа из донной поверхности на морском дне могут образоваться, в зависимости от осадка, увлекаемого движущим флюидом, скорости его миграции и энергии выброса, различного рода элементы— это купола, диапиры, грязевые вулканы, седиментационные шлейфы (плюмы), покмарки. Среди них интересными объектами оказались покмарки (англ. — оспины, выбоины) или блюдцеобразные, кратероподобные понижения в рельефе, которые образуются при выходе на поверхность только газа, образующиеся в рыхлых

тонкозернистых осадках [2]. Размеры покмарков колеблются от нескольких метров до нескольких десятков метров при глубине 5-10 м. Образования размерами более 350 м и глубиной свыше 35 м были названы гигантскими покмарками. Морфологические особенности покмарок обусловлены литологическим составом донных отложений.

Основная цель данной работы заключается в развитии исследований по определения газовых выбросов метана с помощью акустических методов зондирования морского дна и возможности применения для таких исследований акустического профилографа и гидролокатора бокового обзора, разработанных в ИПМТ ДВО РАН [3, 4].

1 Газовые факелы, зарегистрированные в Восточно-Сибирском море

Огромные выбросы метана были зафиксированы на восточносибирском шельфе привлекли внимание исследователей из ДВО РАН в 2008 году во время экспедиции на судне "Яков Смирницкий". Во время проведения экспедиционных исследований использовался комплекс сейсмоакустического оборудования, что позволило определить строение верхней осадочной толщи, особенности и тренды ее развития, а также признаки деградации газосодержащих пород вечной мерзлоты, включая фиксацию имеющихся газовых факелов. Сейсмоакустические исследования проводились с использованием низкочастотного двустороннего гидролокатора бокового обзора с рабочими частотами 85 левого борта и 82 кГц правого борта, с полосой обзора до 2х750 м, разработанным Институтом проблем морских технологий, а также судовой промерный эхолот (Survey echosounder “AtlasDeso 10”) с-частотой излучения 30 кГц. с целью определения глубины места, просмотра рельефа дна и неоднородностей в толще воды, в том числе возможности обнаружения ожидаемых газовых выбросов по ходу движения судна. На рис, 1 представлены результаты комплексных измерений, полученных при помощи ГБО и эхолота, газовых факелов, связанных с выходящими из донных отложений всплывающими пузырьками, зарегистрированными в районе восточносибирского арктического шельфа.

Кроме структурного картирования решалась задача выявления области развития многолетнемерзлых пород, с которыми опосредовано связаны области метановых выходов. По одной из гипотез деградация многолетнемерзлых пород способствует перетокам метана из глубинных толщ в вышележащие слои, вплоть до выхода на поверхность дна. Установленные закономерности в строении осадочного чехла, рельефа дна и газопроявлений можно использовать для реконструкции истории развития Арктики, трассирования границ криолитозоны и определения признаков скопления углеводородов в самый широкий и мелководный шельф Мирового океана – Восточно_Сибирский арктический шельф, на территории которого сосредоточена значительная доля арктических мелководных гидратов и

более 80 % которого содержат реликтовые субмаринные мёрзлые толщи, состояние которых определяет масштабы выбросов пузырькового метана из донных осадков в водную толщу и атмосферу.

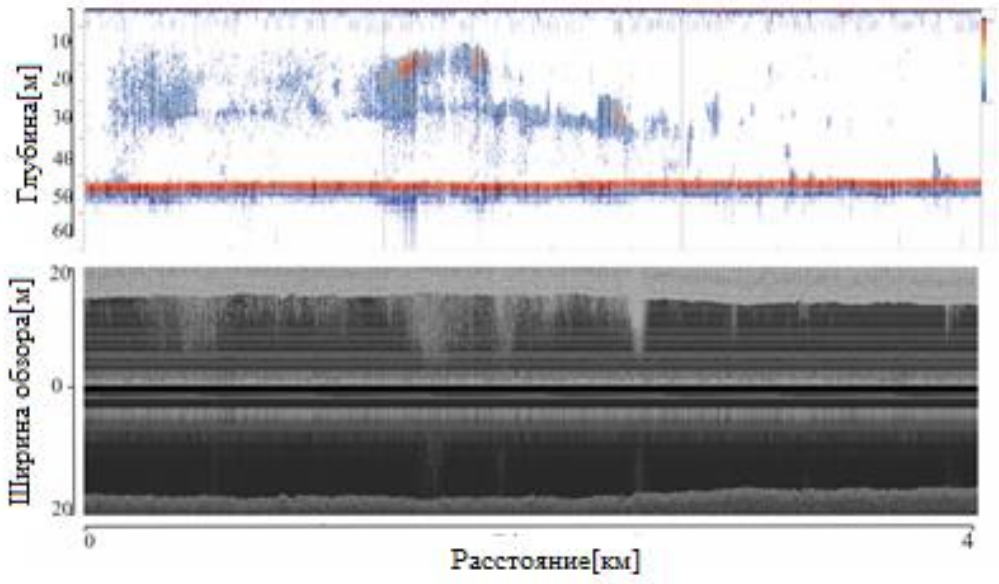


Рис. 1. Результаты синхронных измерений эхограмм газовых факелов, зарегистрированных на восточносибирском шельфе, верхний график эхограмма зарегистрированная судовым эхолотом, нижний эхограмма получен

2 Покмарки обнаруженные в глубоводном районе Японского моря

Обследование глубоководного участка дна проводилось автономным необитаемым подводным аппаратом «Клавесин», комплексированная гидроакустическая съемка производилась акустическим ЛЧМ профилографом с глубиной прозвучивания до 40 м в донном грунте и с рабочей полосой частот 3- 8 кГц, и низкочастотным гидролокатором бокового обзора с рабочей частотой 80 кГц, с полосой обзора до 2х80 м. Съемка участка дна приводилась на параллельных галсах с эффективным перекрытием около 20% (для обеспечения сплошного покрытия площади полосами озвучивания).

На рис. 2 приведена профилограмма дна, полученная в глубоководном районе Японского моря (глубина моря 2830 м). АНПА двигался со средней скоростью 0,88 м/с (1,7 узла), общая длина обследуемого участка составила 2723 м. Тип грунта: илистые слоистые структуры с сильным поглощением акустического сигнала. На профилограмме заметны два основных слоя, между которыми возможны полости с водой, и выходы этих полостей на донную поверхность. Это подтверждается и данными ВЧ ГБО, на рис. 3 представлен фрагмент эхограммы с гидролокационным изображением «воронки» [5].

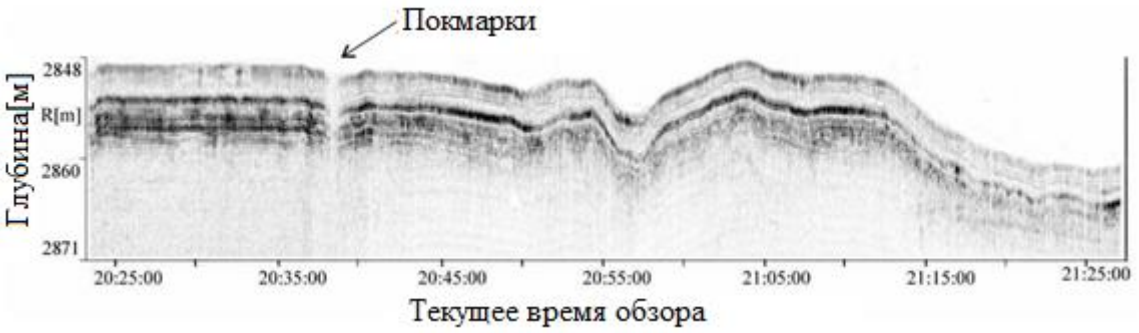


Рис. 2. Профилограмма дна, полученная в глубоководном районе Японского моря

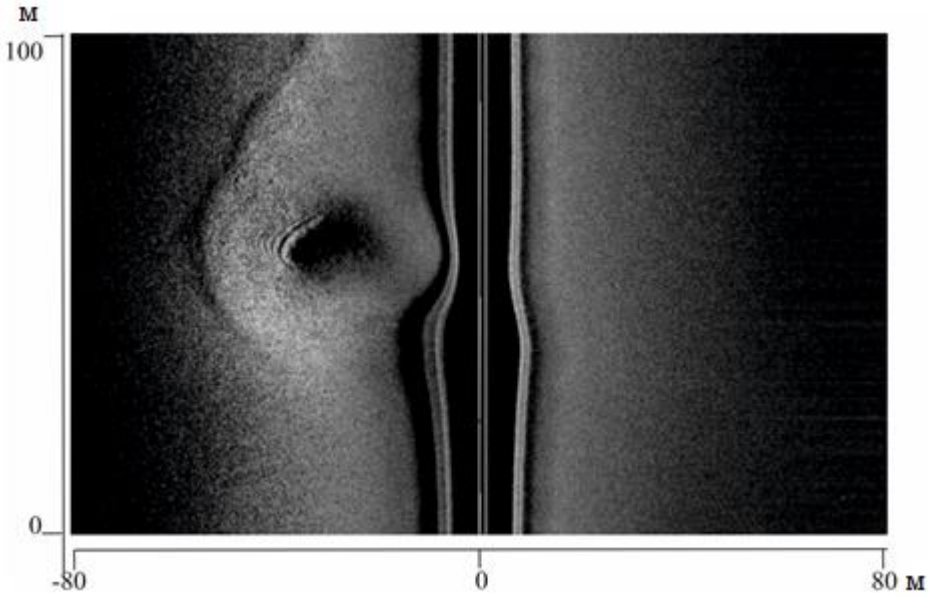


Рис. 3. Фрагмент эхограммы ВЧ ГБО с гидролокационным изображением «воронки»

Заключение

В работе представлен обобщен опыт использования гидролокационной аппаратуры (НЧ и ВЧ ГБО, акустического профилографа) разработанной ИПМТ, работающей, как в составе АНПА так и на буксируемых носителях, с целью регистрации выходов газа метана из донной поверхности. Полученные эсперементальные данные могут быть полезными, как для поиска месторождений нефти и газа, так и влияния этих процессов на изменение климата на планете (ускорение глобального потепления) и изучения морфология флюидогенных форм связанных с литологическим составом приповерхностных донных отложений. И как следует из приведенных примеров, география таких примеров довольно обширна.

Список литературы

1. *Черных Д.В., Юсупов В.И., Саломатин А.С. и др.* Новый акустический метод количественной оценки пузырькового потока метана в системе донные отложения –

водная толща и его реализация на примере моря Лаптевых, Северный Ледовитый океан // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329. № 11. С. 153–167.

2. *Логвина Е.А., Матвеева Т.В., Гладыш В.А., Крылов А.А.* Комплексные исследования покмарков на Чукотском плато. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2011. 2(88). С. 45—54.
3. *Kosarev G.* Experience of Using Sonar Equipment Developed by the Institute of Marine Technology Problems Far East Branch Russian Academy of Sciences to Search for Methane Gas Outlets // 2025 International Conference on Ocean Studies. (ICOS). Vladivostok, Russia, 2025. P. 189-192.
4. *Косарев Г. В.* Обнаружение каналов миграции парниковых газов из придонных отложений с помощью гидролокационных средств / Г.В. Косарев // Актуальные вопросы науки и практики: Сборник научных статей по материалам XIX Международной научно-практической конференции 6 марта 2026, Уфа. 2026. С. 36-42.
5. *Косарев Г. В., Ларионов Ю. Г.* Использование акустического профилографа на борту АНПА для исследования структуры морского дна. // Технические проблемы освоения Мирового океана: сборник трудов Международной научно-технической конференции. Владивосток. 2007. С. 360–363.

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39438

Опыт сейсмических работ с автономной секционной донной сейсмокосой в Обской губе в 2025 году

Корольков З.А., Лесонен Д.Н., Ларичев В.А., Смирнов В.А., Максимов Г.А.

Акустический институт им. академика Н.Н. Андреева, г. Москва;

E-mail: gamaximov@mail.ru

В АО «АКИН» разработан целый ряд программно-аппаратных комплексов и оборудования, предназначенных для различных видов морской сейсморазведки. В частности, разработан программно-аппаратный комплекс на основе автономной секционной донной сейсмокосы (ПАК АСДС), который предназначен для детальной сейсморазведки на шельфе и в транзитной зоне. Комплекс включает 30 секций донной сейсмокосы совокупной длинной 6 км и автономный радиобуй с системами автономного питания, сбора и хранения данных, радио- и wi-fi связи, спутниковой синхронизации. Каждая секция сейсмокосы содержит 16 цифровых 5-ти компонентных датчика (2 гидрофона + 3 геофона). Конструкция датчиков позволяет производить их индивидуальное позиционирование и определение ориентации на дне с использованием ультразвукового канала пингировки.

В докладе представлена информация об опыте полевых сейсмических работ с АСДС в Обской губе в сезоне 2025 года.

Ключевые слова: морская сейсморазведка, донная сейсмокоса, акустическое позиционирование

УДК 534.2 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39439

Исследование времен прихода импульсных сигналов при распространении из мелкого моря в глубокий океан в волноводах Японского моря

Сорокин М.А.[1)], Ткаченко П.Д. [1)], Сокиркина Д.В. [2)], Шкрамада С.С. [1)]
[1)] Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичёва Дальневосточного отделения РАН, г. Владивосток;
[2)]Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток;
Тел.: (914 6972958); Факс: (423 2312573)
E-mail: (sorokin.ma@poi.dvo.ru)

Представлено описание результатов натурного эксперимента, проводившегося в августе 2023 г. в Японском море по излучению и приему импульсных акустических сигналов для сценария “шельф–глубокое море”. Особенностью экспериментального волновода является деление на мелководную и глубоководную части, приблизительно равные по длине. Обсуждаются результаты математического моделирования распространения импульсных акустических сигналов из шельфовой зоны в глубокое море для данной трассы. Описана модовая структура поля в волноводе, получены теоретические оценки времен прихода модовых компонент акустического сигнала. Обнаружено и объяснено теоретически нетипичное для данного класса задач образование плотного пучка модовых компонент малых номеров. Данное явление связано как с конфигурацией волновода, разделенного в приблизительно равных долях на глубоководную и мелководную часть, так и с ориентацией акустической трассы под острым углом относительно градиента глубин, что создает условия для возникновения явления горизонтальной рефракции. Сопоставление экспериментальных импульсных характеристик волновода и оценок времен прихода дает основание полагать, что отличительной особенностью акустических трасс такого типа является расщепление основного пика импульсной характеристики волновод а и появление вместо него двух (и более) локальных максимумов.

Ключевые слова: акустическая навигация, групповые скорости, метод нормальных волн

Работа выполнялась при поддержке гранта РНФ # 22-11-00171п.

STUDY ON ARRIVAL TIMES OF PULSE SIGNALS IN THE CASE OF SHALLOW-TO-DEEP PROPAGATION IN WAVEGUIDES OF THE SEA OF JAPAN

Sorokin M.A.[1)], Tkachenko P.D. [1)], Sokirkina D.V. [2)], Shkramada S.S. [1)]
[1)] V.I. Il’ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok, 690041 Russia;
[2)] Far Eastern Federal University, 10 Ajax, Vladivostok, 690022 Russia;
E-mail: (sorokin.ma@poi.dvo.ru)

The study presents the results of a field experiment conducted in August 2023 in the Sea of Japan on the transmission and reception of pulsed acoustic signals in a “shallow-to-deep” scenario. The experimental track consists of the shallow-water and the deep-sea parts of nearly equal length. The results of mathematical modeling of pulsed signal propagation along the track are discussed, the

modal structure of the field in the waveguide is described, and theoretical estimates of the arrival times of the modal components of the acoustic signal are obtained. The formation of two separated in time beams of low-order mode components is observed and explained. This phenomenon is related both to the configuration of the waveguide divided into approximately equal shallow and deep parts, and to the acoustic track orientation at an acute angle to the depth gradient, which creates conditions for the occurrence of horizontal refraction. The comparison of the impulse response functions obtained during the experiment and the theoretical arrival-time estimates indicates that a distinctive feature of acoustic tracks of this type is the splitting of the main peak of the waveguide pulse response, and the appearance of two separate maxima.
Keywords: acoustic ranging, horizontal refraction, group velocities, shallow-to-deep

ВВЕДЕНИЕ

Возрастающую роль в современных исследованиях Мирового океана играют автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА), действующие в условиях большой удаленности от центров управления и связи [1]. Обеспечение подводного позиционирования АНПА, по-видимому, представляется возможным лишь при помощи гидроакустических систем большой дальности, состоящих из источников навигационных сигналов, и приемника, входящего в аппаратный состав АНПА. Точность решения задачи навигации особенно важна при разработке систем позиционирования и управления АНПА, функционирующих в сотнях километров от источников сигналов, размещаемых вблизи береговой черты. В связи с этим особый интерес представляет изучение закономерностей, возникающих при распространении звука из шельфовой области в глубокое море [2]. Возникает вопрос о возможности уверенного приема навигационных сигналов аппаратами, находящимися существенно выше или ниже горизонта оси подводного звукового канала (ПЗК). В данном исследовании описан эффект образования второго плотного пучка мод малых номеров, возникающий при распространении импульсных акустических сигналов из мелкого моря в глубокий океан при условии ориентации трассы под острым углом (около 40 градусов) к градиенту глубин и ее разделения на примерно равные по длине мелководную и глубоководную части.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Приведем краткое описание данных натурного эксперимента по излучению и приёму звука, который проводился на акватории Японского моря в период с 18 по 20 августа 2023 года (рис. 1, *а*) [3]. Акустическая трасса длиной более 140 км состояла из шельфовой (глубиной до 200 м) и глубоководной (до 2700 м) частей (рис. 1, *б*).

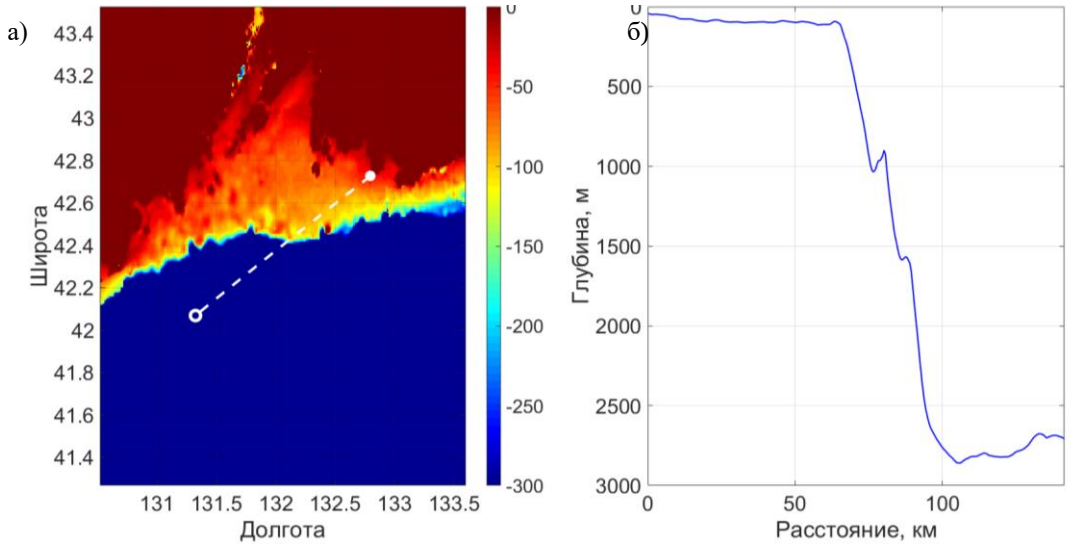


Рис. 1: Батиметрия акватории Японского моря (а). Акустическая трасса выделена белым пунктиром, источник навигационных сигналов – белой точкой, приемник сигналов – белой окружностью (а). На подграфике (б) изображена батиметрия вдоль акустической трассы.

Источник импульсных сигналов находился в 1 м над поверхностью дна, (в месте установки источника глубина моря составляла 40 м), излучая фазоманипулированные сигналы (М-последовательности длиной 1023 символа с заполнением 4 и 16 периодов несущей частоты 400 Гц на символ) в частотной полосе 375-425 Гц. Приём осуществлялся при помощи свободно дрейфующей автономной вертикально распределённой приемной системы с регистрирующими модулями, расположенными на горизонтах 69, 126, 648 и 914 м. По результатам проведенной корреляционной обработки зарегистрированных сигналов с репликами излученных были постороены импульсные характеристики волновода (ИХВ) на каждом горизонте (рис. 2).

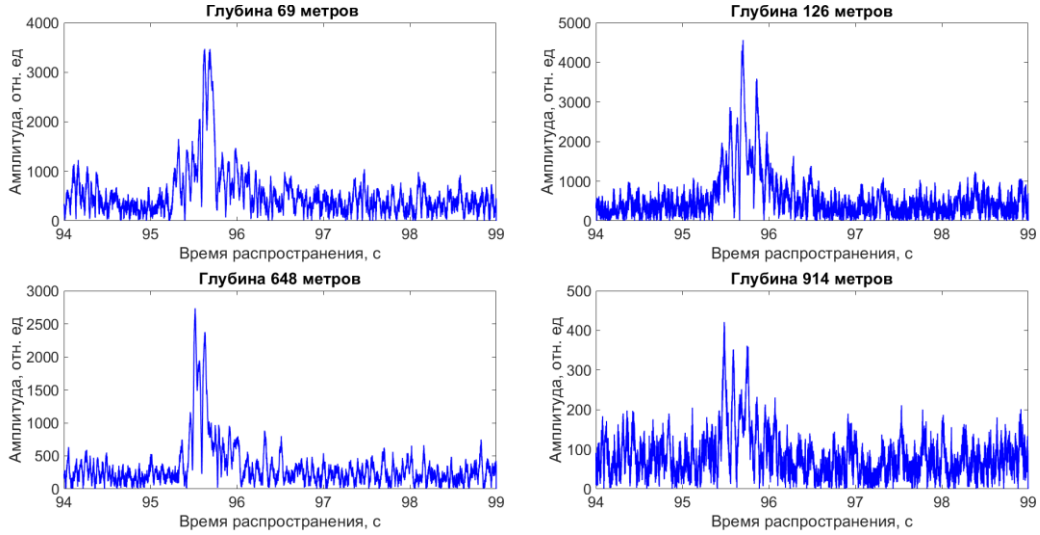


Рис. 2: Импульсные характеристики (взаимнокорреляционные функции излученного и принятого сигналов), соответствующие приемникам на разных глубинах для излучавшихся М-последовательностей длиной 1023 символа с заполнением 16 периодов. Графики приведены к единой шкале по оси Y.

Следует отметить несколько нетипичных закономерностей для подобной постановки задачи – ИХВ с отчетливо различимыми пиками были получены на всех глубинах, приходы акустической энергии в точку приема практически одновременно, а также расщепление пика ИХВ и появление вместо него двух максимумов. Для объяснения данных закономерностей проведем моделирование распространения звука.

АКУСТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В ВОЛНОВОДЕ

На первом этапе для оценки акустической освещенности волновода в глубоководной части было проведено двумерное моделирование – расчёт комплексного поля акустического давления $P(x, z)$ при помощи программы RAM [4] (рис. 3).

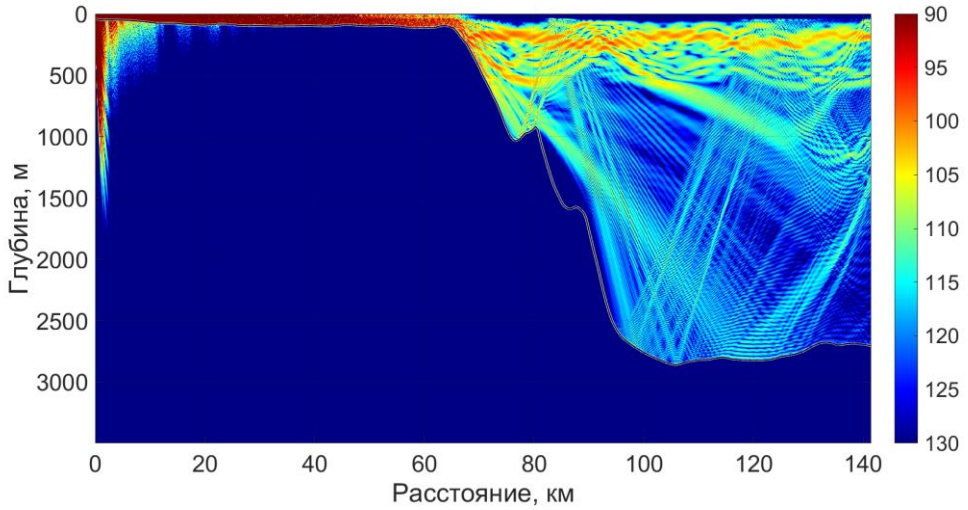


Рис. 3: Контурный график потерь на распространение в волноводе (в дБ относительно 1 м), построенное вдоль геодезической. Заметна равномерная засветка в глубоководной части волновода в диапазоне глубин от 50 до 600 метров с эпизодическим охватом глубин до 1000 метров.

В ранее проводившихся экспериментах акустическая трасса была ориентирована вдоль градиента глубины, мелководный участок был относительно коротким, поэтому типичным диапазоном глубин, в котором обнаруживалась равномерная засветка, являлся интервал от 50 до 500 м. В рассматриваемом же случае трасса ориентирована под острым углом (около 40 градусов) к градиенту глубин, что делает мелководный участок более протяженным, но, при этом, уменьшает средний угол наклона дна на его протяжении. Это создает условия для более выраженного проявления эффекта акустического оползня и, как следствие, для возбуждения мод больших номеров в глубоководной части [5]. В обсуждаемом эксперименте данный эффект обуславливает возможность обеспечить уверенный прием импульсных сигналов на глубинах от 600 до 1000 метров, по крайней мере на некоторых участках трассы. Данный эффект не связан с горизонтальной рефракцией и проявляется в рамках двумерной модели распространения звука.

РАСЧЕТ ВРЕМЕН ПРИХОДА МОДАЛЬНЫХ КОМПОНЕНТ

В силу того, что мелководная часть трассы достаточно протяженна, практический интерес представляют и трехмерные эффекты, возникающие при распространении звука в мелком море [6]. Одним из таких эффектов является горизонтальная рефракция, влияние которой на распространение звука заключается в искривлении горизонтальных лучей, соответствующих вертикальным модам, вследствие наличия градиентов глубины и/или скорости звука [7] в поперечном к трассе направлении. Рассчитаем времена прихода модальных компонент акустического сигнала и сравним их с ИХВ (рис. 4).

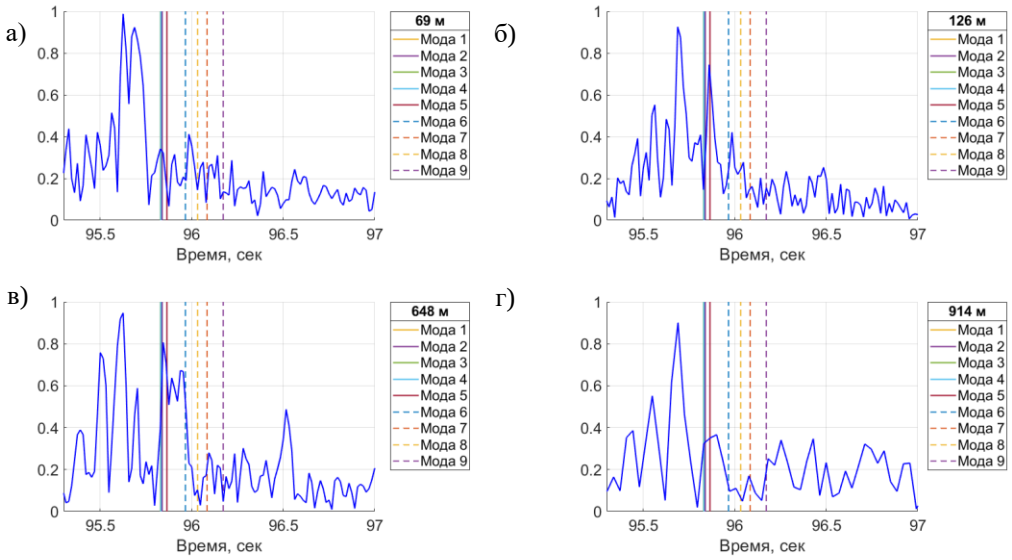


Рис. 4: Импульсные характеристики волновода, полученные по результатам корреляционной обработки сигналов, зарегистрированных на глубинах 69, (*а*), 128 (*б*), 648 (*в*) и 914 (*г*) метров с наложенными на них теоретическими оценками времен прихода модовых компонент акустического сигнала с первой по пятую (сплошные вертикальные линии) и с шестой по девятую (пунктирные горизонтальные линии).

Модовые компоненты с первой по пятую образуют пучок, с которым можно отождествить приход акустической энергии, соответствующей пику ИХВ, что является типичным поведением мод малых номеров при распространении в сложных волноводах, включающих шельф, свал глубин и глубокое море [8]. В рассматриваемом случае интерес представляет нестандартное поведение мод с шестой по девятую, связанное как с образованием второго пучка с очень узким временным интервалом (менее 0.4 сек). Данный эффект, видимо, порождается нестандартной постановкой задачи (делением трассы на мелководную и глубоководную части в равных долях).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем исследовании работе описаны результаты моделирования распространения звука из шельфовой области в глубокое море при условии практически

равного разделения акустической трассы длиной 140 км на мелководную и глубоководную части. При двумерном моделировании обнаружено рассеяние звука на шельфе, следствием которого является интенсивная засветка волновода в диапазоне глубин от 50 до 600 метров, и локальная – от 600 до 1000 метров, что обеспечивает возможность уверенного приема звука на глубинах до 1 км с приемлемым уровнем отношения «сигнал-шум» на некоторых отрезках трассы, а также появление второго пучка мод (с шестой по девятую), что нетипично для задач дальнего распространения звука в океане. Данная закономерность является следствием организации эксперимента с двумя ключевыми условиями – расположение акустической трассы под углом к градиенту глубин и деление ее на мелководную и глубоководную части в равных долях. Наличие второго пучка мод облегчает интерпретацию импульсных характеристик волновода, для которых характерно наличие более одного максимума. Сопоставление данных максимумов и двух пучков модовых компонент способно повысить точность интерпретации ИХВ и решения задачи навигации АНПА. Открытые закономерности, с одной стороны, расширяют интервал глубин, в которых возможно решать задачу навигации АНПА при исследовании глубоководных морских и океанических сред, с другой стороны, повышают точность решения данной задачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Peter N. Mikhalevsky, Brian J. Sperry, Katherine F. Woolfe, Matthew A. Dzieciuch, Peter F. Worcester*; Deep ocean long range underwater navigation // J. Acoust. Soc. Am. – 2020. Vol**. 147** (4). – P. 2365–2382
2. *W.H. Munk*; Sound channel in an exponentially stratified ocean with applications to SOFAR // J. Acoust. Soc. Am. – 1974. – V. **55**. – P. 220–226.
3. Исследование времен прихода импульсных сигналов при распространении из мелкого моря в глубокий океан в волноводах Японского моря, *Ю.Н. Моргунов, А.В. Буренин, А.А. Голов* // Акустический журнал. – 2025. – Т.**71**. – № 5.
4. *Michael D. Collins*; A split-step Padé solution for the parabolic equation method // J. Acoust. Soc. Am. – 1993. - Vol. **93** (4): P. 1736–1742.
5. *Frederick D. Tappert, John L. Spiesberger, Michael A. Wolfson*; The mudslide effect // J. Acoust. Soc. Am. – 2001. – Vol.**110** (5_Supplement): P. 2718.
6. *Boris Katsnelson, Valery Petnikov, and James Lynch*. Fundamentals of shallow water acoustics. Springer Science & Business Media, 2012. 540 p.
7. R.N. Baer; Propagation through a three-dimensional eddy including effects on an array, // J. Acoust. Soc. Am. – 1981. – Vol**. 69**. – P. 70-75.
8. Соответствие между лучевой и волновой картинами и подавление хаоса при дальнем распространении звука в океане / *Д. В. Макаров, Л. Е. Коньков, М. Ю. Улейский* // Акустический журнал. – 2008. – Т. **54**, № 3. – С. 439-450.

УДК: 534.231 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39440

Взаимодействие нормальных мод и квазимод в мелководных акустических волноводах

В.А. Григорьев

Воронежский государственный университет.
Университетская пл. 1, Воронеж 394018, Россия.
E-mail: grig4@yandex.ru

Аннотация: В работе представлены результаты расчетов акустического поля в неоднородном мелководном волноводе, выполненных двумя методами – с помощью модовой теории (МТ) и широкоугольного параболического уравнения (ПУ). Целью исследования являлась верификация уравнений взаимодействия нормальных мод и квазимод, полученных в рамках модового описания поля с использованием разреза Пекериса. При моделировании параметры волновода были выбраны соответствующими условиям Карского моря с глубиной 40 м и водоподобным жидким дном. Неоднородность задавалась в виде уединенного солитона внутренних волн амплитудой 10 м и шириной 170 м (по уровню 0.5), движущегося вдоль акустической трассы длиной 4 км. Частота источника звука составляла 100 Гц. Показано, что при движении солитона по трассе возникают флуктуации интенсивности поля как на одиночных приемниках, так и при усреднении по вертикальной антенне. Согласно МТ, эти флуктуации определяются взаимодействием одной нормальной моды и одной квазимоды. Результаты расчетов, выполненных с помощью МТ и широкоугольного ПУ, демонстрируют хорошее взаимное согласие, что подтверждает адекватность уравнений взаимодействия нормальных мод и квазимод при модовом описании поля в мелком море.

Ключевые слова: мелкое море, мелководный волновод, нормальная мода, квазимода, разрез Пекериса.

Coupling of normal modes and quasimodes in shallow-water acoustic waveguides

V.A. Grigorev

Voronezh State University. Voronezh 394018, Russia.
E-mail: grig4@yandex.ru

Abstract: This paper presents the results of acoustic field calculations in an inhomogeneous shallow-water waveguide, performed using two methods: mode theory and a wide-angle parabolic equation. The aim of the study was to verify the coupling equations for normal modes and quasimodes obtained within the framework of the mode description of the field using the

Pekeris cut. In the modeling, the waveguide parameters were chosen to correspond to the conditions of the Kara Sea with a depth of 40 m and a water-like liquid bottom. The inhomogeneity was specified as a solitary soliton of internal waves with an amplitude of 10 m and a width of 170 m (at the 0.5 level), moving along a 4-km acoustic path. The frequency of the sound source was 100 Hz. It is shown that as the soliton moves along the path, fluctuations in the field intensity arise both at single receivers and when averaging over a vertical antenna. According to mode theory, these fluctuations are determined by the coupling of one normal mode and one quasimode. The results of calculations performed using mode theory and the wide-angle parabolic equation demonstrate good mutual agreement, confirming the adequacy of the equations for the coupling of normal modes and quasimodes in the mode description of the field in shallow water.

Keywords: shallow water, shallow-water waveguide, normal mode, quasimode, Pekeris cut.

PACS: 43.30.+m, 43.30.−k, 92.10.Vz

Введение

В данной работе исследуется акустическое поле в моделях открытых мелководных волноводов, т.е. неограниченных по глубине. Для однородной по горизонтали модели существует точное решение для поля точечного источника, которое выражается в виде несобственного интеграла. После применения теоремы о вычетах точное решение представляется в виде суммы дискретного спектра (ДС) и непрерывного спектра (НС). ДС – это сумма вычетов в полюсах подынтегральной функции (в терминах МТ каждый вычет называется модой). НС – интеграл по берегам разреза, идущего от точки ветвления комплексного квадратного корня, присутствующего в подынтегральной функции. Вклад ДС и НС в полное поле меняется в зависимости от способа проведения разреза. При использовании разреза Пекериса вклад НС минимизируется, а ДС описывается суммой нормальных мод и квазимод [1]. Нормальные моды – это частные решения уравнения Гельмгольца, удовлетворяющие граничным условиям и условию излучения на бесконечности. Квазимоды удовлетворяют всем перечисленным выше условиям за исключением последнего. В результате, в отличие от нормальных мод, амплитуда квазимод не убывает, а растет в дне с увеличением глубины. В рамках МТ, как правило, пренебрегают вкладом НС и описывают поле только с помощью ДС.

Для неоднородной по горизонтали модели волновода, имеющей цилиндрическую симметрию, решение строится по методу поперечных сечений. Для каждого сечения рассматривается однородная модель (волновод сравнения), для которой находится свой набор мод ДС, а влияние неоднородностей описывается через взаимодействие мод (ВМ). В работе

[2] впервые получены уравнения ВМ (см. также [3]), учитывающие взаимодействие нормальных мод и квазимод. Проверку этих уравнений можно провести, вычисляя поле в рамках МТ и с помощью широкоугольного ПУ. Эти вычисления являются целью данной работы.

Постановка задачи и ее решение в рамках МТ

Рассмотрим модель волновода, изображенного на рис. 1, *а*. Параметры задачи возьмем соответствующими условиям Карского моря. Невозмущенный профиль скорости звука в воде $c_0(z)$ показан на рис. 1, *б*; он вычислен по формуле Лероя с использованием показаний температуры и солености из [4]. Глубина моря $H = 40$ м, скорость звука в дне $c_b = 1460$ м/с, плотность дна $\rho_b = 1.85$ г/см^3, донные потери $\beta_{\lambda b} = 0.4$ дБ/λ, плотность воды $\rho = 1$ г/см^3. Источник расположен в точке $r = 0$ на глубине $z_0 = 38$ м, частота звука $f = (2\pi)^{-1}\omega = 100$ Гц. Расчеты акустического поля будем проводить на расстоянии $R = 100H = 4$ км от источника. Возмущение в волноводе зададим в виде уединенного солитона внутренних волн:

$$c(r,z,r_0) = \begin{cases} c_0(z), & r \notin [r_0 - L, r_0 + L], \\ c_0(z - \eta(r,z,r_0)), & r \in [r_0 - L, r_0 + L], \end{cases} \tag{1}$$

где $\eta(r,z,r_0) = A(z)\operatorname{sech}^2(a(r - r_0))$ – смещение слоев воды в солитоне Кортевега–де Вриза, $r_0 = 0.5 \div 3.5$ км – расстояние от источника до пика солитона, $a = 0.01$ м$^{-1}$ – параметр, характеризующий ширину солитона (соответствует ширине 170 м по уровню 0.5), $L = 300$ м, $A(z)$ – смещение слоев воды при $r = r_0$ в зависимости от глубины. Полагаем, что при $z = z_p = 15$ м достигается максимальное смещение: $A_0 = \max A(z) = 10$ м (амплитуда солитона). На границах водного слоя $A = 0$. При других глубинах, не усложняя модель, будем использовать линейную интерполяцию: $A(z) = \begin{cases} A_0 z_p^{-1} z, & 0 \le z \le z_p, \\ A_0 (z_p - H)^{-1}(z - H), & z_p < z \le H. \end{cases}$ На рис. 1, *а* солитон Кортевега–де Вриза показан синим цветом в виде изолинии скорости звука, максимально смещенной вниз. На рис. 1, *б* максимальное смещение показано стрелкой.

Поле в волноводе описывается функций Грина P, являющейся решением задачи:

$$\begin{gathered} \left\{ \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2}{\partial z^2} + K^2 \right\} P = -\delta(z - z_0)\frac{\delta(r)}{2\pi r}; \\ P\big|_{z=0} = 0, \quad P\big|_{z=H-} = P\big|_{z=H+}, \quad \frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial z}\bigg|_{z=H-} = \frac{1}{\rho_b}\frac{\partial P}{\partial z}\bigg|_{z=H+}; \quad |P| = O(1), \quad (r,z) \to \infty; \end{gathered} \tag{2}$$

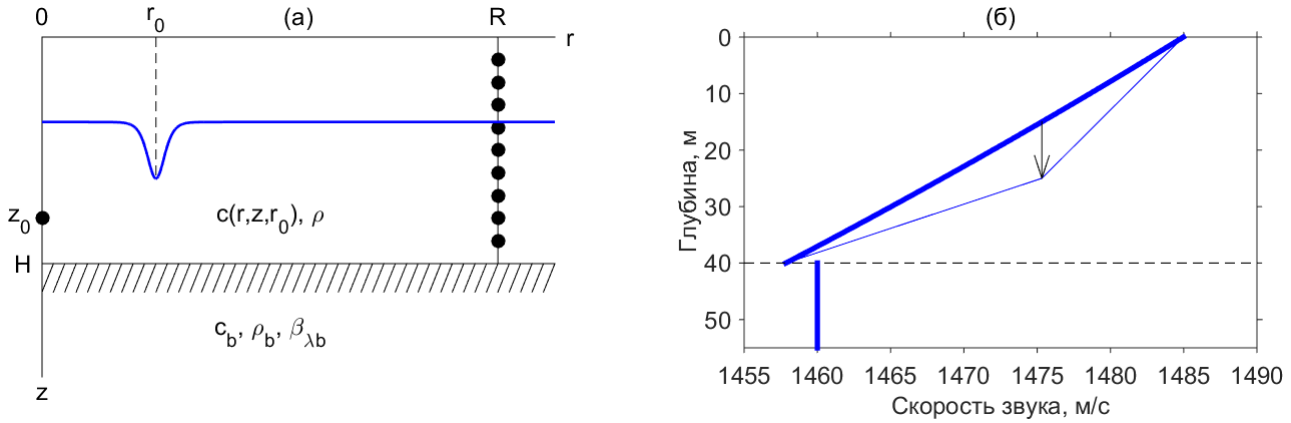


Рис. 1. (а) – Модель волновода. (б) – Профили скорости звука: невозмущенный (жирная линия) и возмущенный на пике солитона (тонкая линия). Скорость звука в дне 1460 м/с близка к скорости звука в воде (т.н. водоподобное дно).

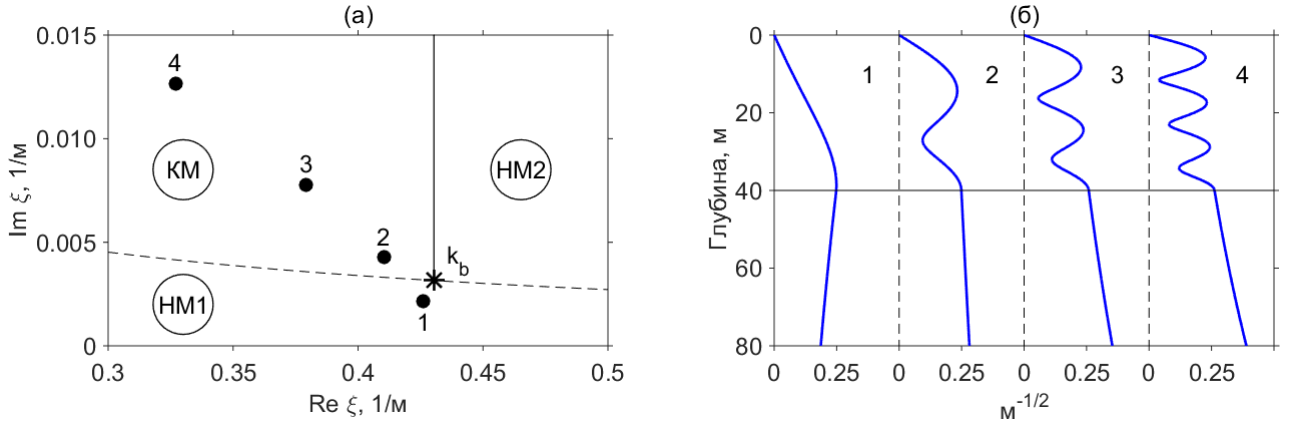


Рис. 2. (а) – Расположение собственных чисел на комплексной плоскости для невозмущенного волновода. Точка 1 соответствует нормальной моде, точки 2–4 – квазимодам. (б) – Модуль собственных функций первых четырех мод.

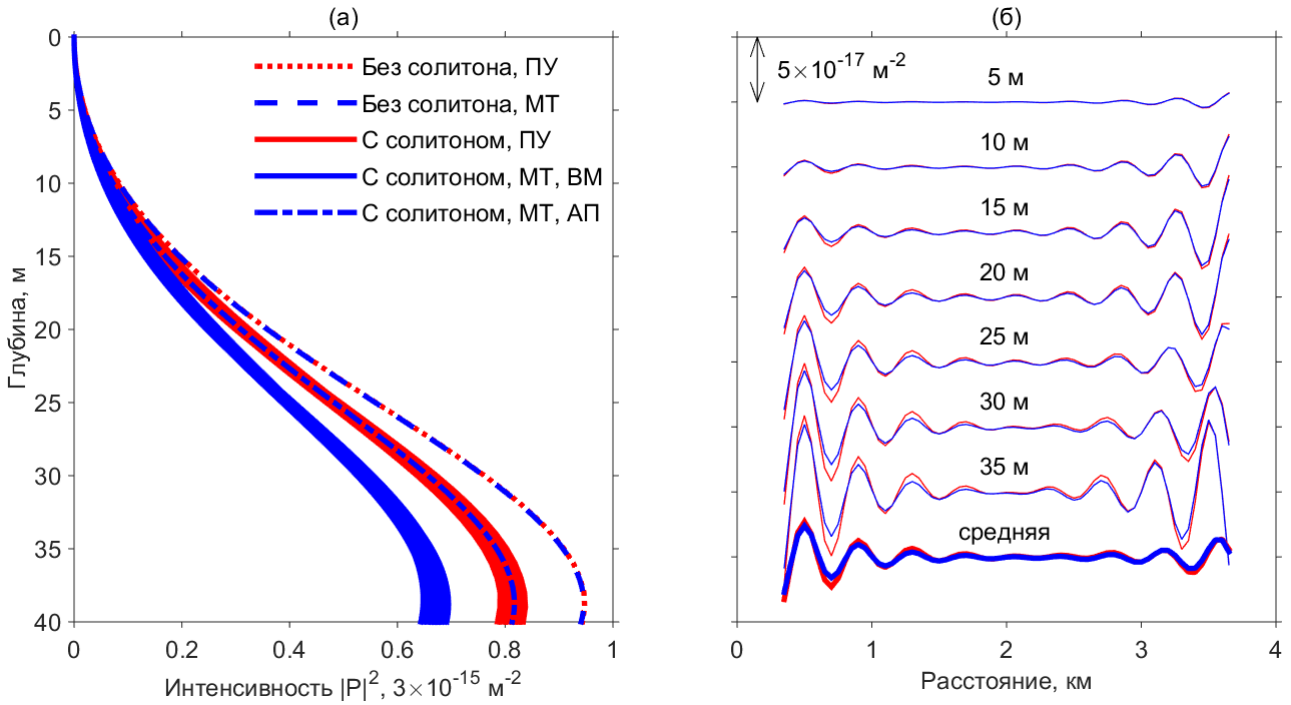


Рис. 3. Интенсивность поля на расстоянии 4 км от источника. (а) – Вертикальные профили интенсивности с солитоном и без солитона на трассе. Профили с солитоном показаны при расстояниях 0.5÷3.5 км между солитоном и источником. (б) – Флуктуации интенсивности в зависимости от расстояния солитон–источник. Тонкие линии – флуктуации на отдельных глубинах. Жирные линии – флуктуации усредненной по глубине интенсивности. Красный цвет – ПУ. Синий цвет – МТ.

где $K=\begin{cases}k,\ 0<z<H\\ k_b,\ z>H\end{cases}$, $k=\dfrac{\omega}{c}$, $k_b=\dfrac{\omega}{c_b}\left(1+i\dfrac{\beta_{\lambda b}}{b}\right)$, $b=40\pi\lg e\approx 54.6$, $\delta(\cdot)$ – дельта-функция Дирака. В рамках МТ решение (2) при $r=R$ и $0\le z\le H$ имеет вид [2, 3]

$$P=\sum_{m=1}^{M}C_m(R)\left[q_m(R)R\right]^{-1/2}\psi_m(R,z)\exp\left[i\int_0^R q_m(r)dr\right], \tag{3}$$

где ψ_m и $\xi_m=q_m+i\gamma_m/2$ – нормированные собственные функции и собственные значения задачи Штурма–Лиувилля (штрих означает производную по z):

$$\begin{gathered}\psi_m''+\left(k^2-\xi_m^2\right)\psi_m=0,\quad \psi_m(r,0)=0,\quad \psi_m(r,H)+g_m\psi_m'(r,H-)=0,\\ \int_0^H\psi_m^2(r,z)dz+g_m\psi_m^2(r,H)/\left(2m_b^2\right)=1,\end{gathered} \tag{4}$$

$m_b=\dfrac{\rho_b}{\rho}$, $g_m=\dfrac{im_b}{\varepsilon_{bm}}$, $\varepsilon_{bm}=\begin{cases}\varepsilon_{bm}^M,\ \xi_m\notin G\\ -\varepsilon_{bm}^M,\ \xi_m\in G\end{cases}$, $\varepsilon_{bm}^M=\sqrt{k_b^2-\xi_m^2}$ – главное значение корня (sqrt в MATLAB), G – область совместного выполнения условий $\operatorname{Re}\xi_m>\operatorname{Re}k_b$ и $\operatorname{Im}\varepsilon_{bm}^M<0$.

Описанное правило вычисления ε_{bm} соответствует разрезу Пекериса, который проводится вертикально вверх от точки ветвления k_b (рис. 2, *а*). В итоге, первая четверть комплексной плоскости, где ищутся ξ_m, делится на три области: НМ1 – область вытекающих нормальных мод ($\operatorname{Re}\varepsilon_{bm}>0$, $\operatorname{Im}\varepsilon_{bm}>0$), НМ2 – область втекающих нормальных мод ($\operatorname{Re}\varepsilon_{bm}<0$, $\operatorname{Im}\varepsilon_{bm}>0$), КМ – область квазимод ($\operatorname{Re}\varepsilon_{bm}>0$, $\operatorname{Im}\varepsilon_{bm}<0$). Классификация мод будет понятна, если учесть, что в дне $\psi_m\sim\exp\left[i\varepsilon_{bm}(z-H)\right]$ (подробнее в [5]). В рассматриваемой задаче существует только одна вытекающая нормальная мода (мода 1, рис. 2, *а*) и бесконечное число квазимод (моды 2–4 и др., рис. 2, *а*). На рис. 2, *б* изображены модули собственных функций мод. Видно, что для квазимод модули $|\psi_m|$ растут в дне с глубиной.

Коэффициенты $C_m(R)$ в (3) находятся из системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{gathered}\sum_{n=1}^{M}E_n(\delta_{mn}-I_{mn})\frac{dC_n}{dr}=-\sum_{n=1}^{M}E_n\left[V_{mn}+\frac{\gamma_n}{2}(\delta_{mn}-I_{mn})\right]C_n,\quad m=1,\dots,M,\\ C_m(0)=(8\pi)^{-1/2}\exp(i\pi/4)\psi_m(0,z_0),\end{gathered} \tag{5}$$

где $E_n=\sqrt{q_n}\exp\left(i\int_0^r q_n(r')dr'\right)$, $\delta_{mn}=\begin{cases}1, m=n\\ 0, m\ne n\end{cases}$, $I_{mn}=\dfrac{i\psi_m(r,H)\psi_n(r,H)}{m_b(\varepsilon_{bm}+\varepsilon_{bn})}$, $V_{mn}=\int_0^H\psi_m\dfrac{\partial\psi_n}{\partial r}dz$.

Результаты расчетов

Величину $I=|P|^2$ будем для краткости называть интенсивностью акустического поля. Расчет интенсивности в рамках МТ проводился на основе (3). При вычислениях с помощью широкоугольного ПУ использовалась программа RAM (Range dependend Acoustic Model). Результаты расчетов изображены на рис. 3, откуда можно сделать следующие выводы.

1. Для однородного волновода (без солитона) расчеты по ПУ и МТ очень близки (линия из точек и пунктир на рис. 3, *а*), причем поле на расстоянии 4 км определяется модой 1.

2. Для неоднородного волновода (с солитоном) наблюдается уменьшение интенсивности на всех глубинах, что объясняется рассеянием энергии на солитоне (непрерывные линии на рис. 3, *а*). При этом МТ дает в два раза большее снижение интенсивности, чем ПУ.

3. Наблюдаются флуктуации интенсивности относительно среднего уровня при изменении расстояния солитон–источник (рис. 3, *б*). Флуктуации практически совпадают при расчетах по ПУ и МТ, причем как для интенсивности на отдельных глубинах, так и для средней по глубине интенсивности. Причиной флуктуаций является ВМ. Действительно, если в (5) исключить ВМ, приравнивая к нулю коэффициенты ВМ: $V_{mn} = 0$, то получаем адиабатическое приближение (АП), в котором нет флуктуаций (штрихпунктирная линия на рис. 3, *а*). Интересно, что линия АП относительно далеко от линий МТ, но близка к линиям ПУ.

Расчеты показывают, что поле определяется взаимодействием одной нормальной моды и одной квазимоды (моды 1, 2; $M = 2$). При этом хорошее согласие расчетов по ПУ и МТ для переменной составляющей поля (рис. 3, *б*) подтверждает адекватность уравнений (5).

Заключение

В заключение отметим, что МТ позволяет не только рассчитывать, но и анализировать поле в волноводе, объясняя причины явлений. ПУ же в основном служит инструментом расчета поля. Работа поддержана Российским научным фондом, грант № 22-72-10121-П.

Список литературы

1. *Григорьев В.А., Петников В.Г.* О возможности представления акустического поля в мелком море в виде суммы нормальных мод и квазимод // Акуст. журн. 2016. **62**, № 6. С. 681.
2. *Grigor'ev V.A., Lunkov A.A., Petnikov V.G.* Effect of sound-speed inhomogeneities in sea bottom on the acoustic wave propagation in shallow water // Physics of Wave Phenomena. 2020. **28**, № 3. P. 255.
3. *Луньков А.А., Григорьев В.А., Петников В.Г.* Акустические характеристики морского дна и их влияние на дальнее распространение звука на арктическом шельфе // Успехи физических наук. 2024. **194**, № 2. С. 184.
4. Марчук Е.А., Чунчузов И.П., Попов О.Е., Репина И.А., Колов И.Е., Сильвестрова К.П., Осадчиев А.А., Степанова Н.Б., Йоханнессен У.М. Исследование характеристик внутренних волн в Карском море и их влияние на турбулентные потоки тепла и импульса над морской поверхностью // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2024. **60**, № 5. С. 582.
5. *Григорьев В.А.* Оценка скорости звука в газонасыщенном слое осадков по времени прихода сигнала послевестника // Акуст. журн. 2022. **68**, № 3. С. 288.

УДК: 551.46; 534.23 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39441

СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЗВОЛНОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ НИЗКОЧАСТОТНОГО ЗВУКА, РАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ В МЕЛКОМ МОРЕ

О.Э. Гулин [1,a], И.О. Ярощук [1,b]

[1]*Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН.*

690041, Россия, г. Владивосток, ул. Балтийская, д.43.

E-mail: [a]gulinoe@poi.dvo.ru, [b]yaroshchuk@poi.dvo.ru

Аннотация: Рассмотрена двумерно-неоднородная статистическая задача, о влиянии случайно-шероховатой свободной поверхности моря на характеристики интенсивности низкочастотного акустического сигнала при его распространении в мелководном волноводе арктического типа с жидким поглощающим дном. Флуктуации поверхности соответствуют развитому ветровому волнению с частотным спектром Пирсона-Неймана. Исследование проведено методом статистического моделирования для локальных мод в рамках точного решения уравнений поперечных сечений для модовых амплитуд. Показано, что для донной границы с отражающими свойствами, интенсивность сигнала под действием волнения, в отсутствие пространственных усреднений по масштабам интерференции, может испытывать заметные флуктуации. Особенно сильные флуктуации наблюдаются на первом километре расстояний от источника, где при моделировании подлежат учету все моды (и квазимоды), вносящие вклад в звуковое поле. На больших расстояниях от источника прослеживается эффект накопления затухания средней интенсивности, создаваемый поверхностным волнением. Этот эффект, в целом, небольшой по величине до расстояний в десятки километров, постепенно возрастает с увеличением дистанции и описывается усредненным законом спадания.

Ключевые слова: двумерно-неоднородный волновод мелкого моря, случайно-шероховатая поверхность, моды и квазимоды, статистическое моделирование, средняя интенсивность и ее флуктуации.

STATISTICAL MODELING OF THE INFLUENCE OF A WAVE-PERTURBED SURFACE ON THE CHARACTERISTICS OF LOW-FREQUENCY SOUND PROPAGATING IN A SHALLOW SEA

O.E. Gulin[1,a], I.O. Yaroshchuk[2,b]

[1]*V.I. Ilyichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS. Vladivostok 690041, Russia.*

E-mail: [a]gulinoe@poi.dvo.ru, [b]yaroshchuk@poi.dvo.ru

Abstract: A two-dimensional, inhomogeneous statistical problem is considered regarding the influence of a randomly rough free sea surface on the intensity characteristics of a low-frequency acoustic signal propagating in a shallow Arctic waveguide with a liquid absorbing bottom. Surface fluctuations correspond to developed wind waves with a Pierson-Neumann frequency spectrum. The study was conducted using statistical modeling for local modes within the exact solution of cross-sectional equations for mode amplitudes. It is shown that for a bottom boundary with reflective properties, the signal intensity under the influence of waves in the absence of spatial averaging over interference scales can experience noticeable fluctuations. Particularly strong fluctuations are observed in the first kilometer from the source, where all modes (and quasimodes) contributing to the sound field must be taken into account in the modeling. At large distances from the source, a cumulative attenuation effect of average intensity, created by surface waves, is observed. This effect, generally small in magnitude up to distances of tens of kilometers, gradually increases with increasing distance and is described by an average decay law

Keywords: two-dimensional inhomogeneous shallow sea waveguide, randomly rough surface, modes and leaky-quasimodes, statistical modeling, average intensity and its fluctuations

PACS: 43.20.Bi; 43.20.Fn; 43.30.+m ; 05.40.−a

Введение

Работа посвящена исследованию затухания средней интенсивности звукового поля в волноводах с потерями и случайно-шероховатой поверхностью. Несмотря на обширную литературу по проблеме рассеяния волн на шероховатой поверхности выделим лишь ряд исследований [1,2], в которых изучалось поведение средних потерь при распространении сигналов в рамках метода малых возмущений и метода Вентцеля-Крамерса-Бриллюэна (ВКБ). Приближенные расчеты в этих работах показали, что влияние поверхностного волнения на среднюю интенсивность звука в мелководном волноводе весьма мало на расстояниях от источника, превышающих несколько километров. Данные выводы

справедливы для усредненных по интерференционным масштабам и глубине моря законов спадания интенсивности, и при рассмотрении небольшого ансамбля независимых реализаций (10–30). Предлагаемое исследование основано на статистическом моделировании интенсивности без сглаживающих ее дополнительных пространственных усреднений, и выполнено в рамках точной постановки задачи для уравнений акустики [3]. Само моделирование включает представительный ансамбль независимых реализаций флуктуирующей поверхности [4]. Рассмотрены также другие статистические характеристики интенсивности, чему в существующей литературе не уделено достаточного внимания.

1 Математическая формулировка

Рассмотрим модель среды волновода, включающую водную толщу, $0 < z \le H(r)$, и подстилающее полупространство жидких осадков, $z \le 0$. В аксиально-симметричной постановке задачи, когда (r,z) – координаты цилиндрической системы, а точечный источник излучения расположен при $r = 0$, $z = z_0 \in (0,H)$, в мелком море с шероховатой поверхностью $H(r)$, звуковое поле частоты ω описывается линейными уравнениями акустики для звукового давления $p(r,z)$ и колебательной скорости жидких частиц, $w(r,z)$ – вертикальной и $v(r,z)$ – горизонтальной. К уравнениям формулируются соответствующие граничные условия: на неровной поверхности $p(H(r)) = 0$, на границе раздела вода – жидкие осадки непрерывность $p(r,+0) = p(r,-0)$ и нормальной скорости $\upsilon_n(r,+0) = \upsilon_n(r,-0)$, $\upsilon_n = [w^2 + v^2]^{1/2}$. Подразумевается также выполнение условий излучения при $r \to \infty$, и ограниченности поля в полупространстве $z < 0$. Согласно методу поперечных сечений решение уравнений акустики с озвученными условиями в низкочастотном диапазоне целесообразно искать с помощью разложений по локальным модам волновода сравнения в каждом r-сечении:

$$p(r,z) = \sum_{m=1}^{M} \varphi_m(r,z) G_m(r);\ v = [i\rho\omega]^{-1} \sum_{m=1}^{M} \varphi_m F_m(r);\ w = [i\rho\omega]^{-1} \sum_{m=1}^{M} G_m(r) \partial\varphi_m(r,z)/\partial z. \qquad (1)$$

Под знаками сумм в (1) входят модовые амплитуды $G_m(r)$, $F_m(r)$, а также локальные собственные функции $\varphi_m(r,z)$ задачи на собственные значения:

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2}\varphi_m(r,z) + \left[k^2 - \kappa_m^2(r)\right]\varphi_m(r,z) = 0\ ,\ \ \varphi_m(r,H) = 0,\ \ \varphi_m(r,0) + g_m(r)\varphi'_m(r,0) = 0. \qquad (2)$$

В (2) $\varphi'_m(r,0) = (\partial\varphi_m(r,z)/\partial z)|_{z=0}$, $m = 1,2,\ldots M$, $k = \omega/c$, $\kappa_m(r)$ – собственные значения. $g_m(r)$ характеризует импеданс проницаемого дна в виде поглощающего полупространства осадков при $z \le 0$, а шероховатая поверхность задается реализациями случайной функции $H(r)$.

В волновой зоне, $|\kappa_m r| >> 1$, вместо вектор-столбцов $\{G_m(r)\}$, $\{F_m(r)\}$ введем матрицы модовых амплитуд $\mathbf{G}(r)$, $\mathbf{F}(r)$, такие, что $\{G_m(r)\} = \mathbf{G}(r)b_m$, $\{F_m(r)\} = \mathbf{F}(r)b_m$, где $b_m(L) = \{\varphi_m(0,z_0)\kappa_m^{-1/2}(L)\exp[i\kappa_m(L)L]\}$– вектор-столбец амплитуд мод, падающих на часть среды со

случайно-шероховатой поверхностью (L,L_0), $L > 0$. При $r \in (0,L)$ и $r > L_0$ волновод слоистый. Для уравнений метода поперечных сечений справедлива следующая краевая задача [3,5]:

$$\frac{\partial \mathbf{G}(r)}{\partial r} = \mathbf{F}(r) - \mathbf{V}(r)\mathbf{G}(r), \quad \frac{\partial \mathbf{F}(r)}{\partial r} = -\boldsymbol{\kappa}^2(r)\mathbf{G}(r) - \mathbf{V}(r)\mathbf{F}(r), \qquad (3а)$$

$$i\boldsymbol{\kappa}(L)\mathbf{G}(L) + \mathbf{F}(L) = 2i\boldsymbol{\kappa}(L), \quad i\boldsymbol{\kappa}(L_0)\mathbf{G}(L_0) - \mathbf{F}(L_0) = 0\ . \qquad (3б,в)$$

В (3а)–(3в) $\boldsymbol{\kappa}(r)$ – диагональная матрица собственных значений $\kappa_m(r)$, $\mathbf{V}(r)$ – матрица взаимодействия мод с элементами $V_{mn}(r) = \int_{|h_1|}^{H} \frac{\varphi_m(r,z)}{\rho} \frac{\partial \varphi_n(r,z)}{\partial r} dz$, $|h_1|$ – некоторый горизонт в дне, где $\varphi'_m(r,|h_1|) = 0$. Матрица $\mathbf{V}(r)$ здесь кососимметрическая: $V_{nn} = 0$. Для решения задачи (3а,б,в) выполнялась переформулировка в причинные уравнения погружения, позволяющие записать модовые амплитуды через матрицант в приближении однонаправленного распространения (ОР) [5]. Приближение ОР в данной задаче мало отличается от точного решения, поскольку обратно рассеянным полем можно пренебречь с достаточной точностью [3]. Вычисляя поле звукового давления $p(r,z)$ для каждой случайной реализации $H(r)$ из ансамбля N независимых реализаций, для средней интенсивности получим выражение:

$$\langle I \rangle = \langle |p|^2 \rangle = (8\pi r)^{-1} \sum_{m=1}^{M} \langle |G_m|^2 |\varphi_m|^2 \rangle + (8\pi r)^{-1} \sum_{(m \neq n)} \sum_{n} \langle G_m G_n^* (\varphi_m \varphi_n^*) \rangle = \langle I_{нк} \rangle + \langle I_к \rangle\ . \qquad (4)$$

Угловые скобки в (4) означают статистическое усреднение. Важным индикатором относительных флуктуаций интенсивности звука в случайно-неоднородном волноводе является также индекс сцинтилляций S^2, $S = [\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2]^{1/2} / \langle I \rangle$ [3,4,5].

2 Модель стохастического волновода

Для численного анализа рассмотрены значения параметров, характерных для шельфовых зон восточно-арктических морей, в частности, Карского моря [6]. Мелководный волновод, в котором происходит распространение тонального звукового сигнала частоты 250 Гц, имеет среднюю глубину $\langle H(r) \rangle$ = 40 м, шероховатую поверхность и горизонтальное дно. В водном слое однородные профили скорости звука c = 1460 м/с и плотности ρ = 1 г/см^3. Дно – жидкое поглощающее полупространство с показателем преломления на границе раздела вода–дно $n = (c/c_1)(1 + i\beta_1)$, $\beta_1 = 0.01$. В донных осадках задавался импеданс посредством ρ_1 =1.85 г·см$^{-3}$ и c_1. Шероховатости взволнованной поверхности $\delta h(r)$, $H(r) = \langle H \rangle + \delta h(r)$, моделировались гауссовым случайным процессом с корреляционной функцией $B_s(r) = \sigma_s^2 K(r)$, $r = |r_2 - r_1|$. $\sigma_s^2 = \langle (\delta h)^2 \rangle$ – интенсивность флуктуаций, L_s – эффективный радиус корреляции шероховатостей. Коэффициент корреляции $K(r)$ соответствовал частотному спектру Пирсона-Неймана [2,3]. Для него выполнялось численное моделирование с параметрами $\sigma_s^2 \approx 1$ м^2 и $L_s \approx 20$ м, которые описывают развитое волнение в направлении ветра, дующего над поверхностью моря со

скоростью v ≈ 12,6 м/с. В процессе моделирования для получения надежного статистического результата рассчитывался ансамбль реализаций $N = 10^3$ [4].

3 Результаты статистического анализа

Статистическое моделирование средней интенсивности (4) и индекса сцинтилляций выполнено для волновода с отражающим дном, c_1 = 1600 м/с. Учитывались моды дискретного и непрерывного спектров (25 мод), вносящие вклад в поле источника при r > 10 м (с точностью до 0.1 дБ), для чего применялась аппроксимация разреза Пекериса на комплексной плоскости значений к по методике В.Ю. Завадского – В.Д. Крупина: донное полупространство заменялось слоем комплексной толщины $h_1 = |h_1|\exp(i\pi/4)$, с идеальной границей $|h_1|$ = 100 м [7]. На рисунках 1,2 представлены результаты моделирования. Из кривых на графиках видно, что

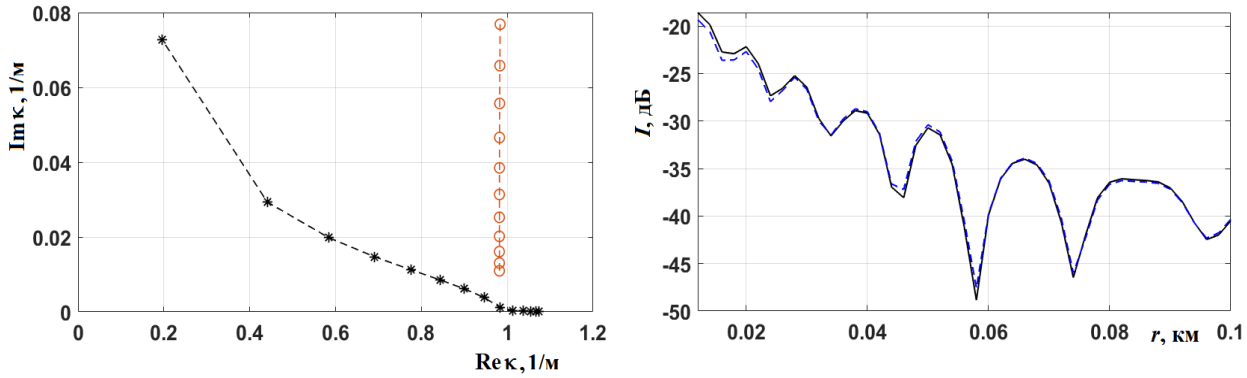


Рис. 1. Невозмущенный волновод. Левый график – расположение полюсов на комплексной плоскости к: черные – собственные значения 6 распространяющихся мод, 4 вытекающих мод и 4 квазимод [8]. Красные – 11 полюсов, аппроксимирующих разрез. Правый график: сплошная кривая – интенсивность в области 10–100 м от источника, сумма 25 мод; штрих кривая – без учета 11 мод разреза.

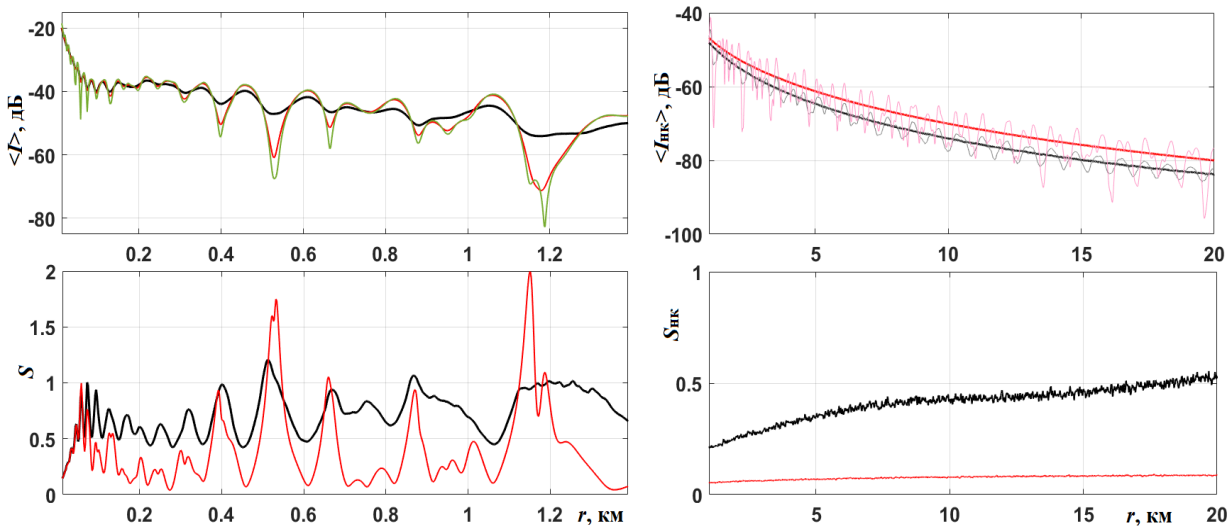


Рис. 2. Затухание средней интенсивности сигнала (верхний график) и индекс сцинтилляций S в волноводе с шероховатой поверхностью и отражающим дном. Кривые: черная - приближение ОР, красная - адиабатическое приближение, зеленая - горизонтальная поверхность H (δh = 0). $z = z_0$ = 1 м. Правые графики – усредненные по интерференции законы спадания интенсивности $\langle I_{нк}\rangle$ (жирные монотонные кривые), и индекс сцинтилляций $S_{нк}$.

флуктуации δh приводят к заметному отличию средней интенсивности $\langle I \rangle$ от I для невозмущенной поверхности уже на дистанциях 10 м – 1 км от источника. В минимумах интерференционной картины, сильно выраженной для таких расстояний при отражающей донной границе, различие уровней может достигать 20-30 дБ ($r \approx 530$ м и $r \approx 1190$ м на рис. 2). При этом индекс сцинтилляций имеет максимумы, превышающие значение $S = 1$, что указывает на сильную стохастичность интенсивности сигнала, наблюдающуюся для этих областей расстояний.

Заключение

Таким образом, результаты статистического моделирования показывают, что флуктуации поверхности могут заметно проявляться в статистических характеристиках интенсивности на весьма небольших дистанциях от источника. В то же время заметного влияния волнения на усредненный закон спадания $\langle I_{\text{нк}} \rangle$ (рис. 2) можно ожидать не ранее дистанций $r \sim 20$–30 км [3].

Работа выполнена в рамках Государственного задания РФ, номер гос. регистрации: 124022100074-9.

Список литературы

1. *Луньков А.А., Петников В.Г.* Влияние случайных гидродинамических неоднородностей на затухание низкочастотного звука в мелком море // Акуст. журн. 2010. **56**, № 3. С. 364.

2. *Луньков А.А., Петников В.Г., Черноусов А.Д.* Затухание звука на океанском шельфе на небольших расстояниях от источника в присутствии поверхностного волнения // Акуст. журн. 2017. **63**, № 2. С. 180.

3. *Гулин О.Э., Долгих Г.И., Ярощук И.О.* О статистическом моделировании акустических потерь при распространении низкочастотного звука в волноводе мелкого моря с развитым поверхностным волнением // Russian Journal of Earth Sciences. 2025. **25**. ES6013.

4. *Гулин О.Э., Долгих Г.И., Ярощук И.О.* О выборе ансамбля случайных реализаций поверхностного волнения для достоверного моделирования статистических характеристик звукового поля в волноводе мелкого моря // Докл. АН. Науки о Земле. 2026. **527**, № 1.

5. *Гулин О.Э., Ярощук И.О., Коротченко Р.А.* О средней интенсивности поля и отдельных мод низкочастотного звукового сигнала в мелководном волноводе со статистически неровной донной границей // Акуст. журн. 2024. **70**, № 4. С. 51.

6. *Григорьев В.А., Петников В.Г., Росляков А.Г., Терехина Я.Е.* Распространение звука в мелком море с неоднородным газонасыщенным дном // Акуст. журн. 2018. **64**, № 3. С. 342.

7. *Крупин В.Д.* Интерференционная структура полного звукового поля точечного гармонического источника в мелком море // Акуст. журн. 1994. **40**, № 4. С. 626.

8. *Григорьев В.А., Петников В.Г.* О возможности представления акустического поля в мелком море в виде суммы нормальных мод и квазимод // Акуст. журн. 2016. **62**, № 6. С. 681.

УДК: 534.873 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39442

О влиянии солитоноподобных внутренних волн на точность акустической дальнометрии в мелководной части Карского моря

Ю.В. Назаренко[1,a], Д.Д. Сидоров[1,b], А.А. Луньков[1,c], В.Г. Петников[1,d]

[1] *Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, ул. Вавилова 38, Москва, 119991 Россия*

E-mail: [a]nazarenko.yv@kapella.gpi.ru, [b]sidorov@kapella.gpi.ru, [c]lunkov@kapella.gpi.ru, [d]petniko@kapella.gpi.ru

В рамках численного моделирования оценены ошибки при определении расстояния между источником и приемником звука по времени распространения акустического сигнала в полосе частот 2-4 кГц на трассе 10 км при наличии цуга из трех солитоноподобных внутренних волн амплитудой 10, 26 и 40 м. Параметры модели соответствовали гидрологическим условиям южной части Карского моря в летний период. Показано, что ошибка при определении расстояния может достигать более чем сотни метров в зависимости от глубины расположения приемника и направления движения внутренних волн (вдоль или поперек трассы). Наибольшие ошибки возникают при поперечном распространении цуга. Результаты значимы для развития систем подводной акустической навигации на арктическом шельфе России.

Ключевые слова: подводная акустическая дальнометрия, солитоны внутренних волн

On the influence of soliton-like internal waves on the accuracy of acoustic range measurement in the shallow part of the Kara Sea

Yu.V. Nazarenko[1,a], D.D. Sidorov[1,b], A.A. Lunkov[1,c], V.G. Petnikov[1,d]

[1] *Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences. Moscow 119991, Russia.*

E-mail: [a]nazarenko.yv@kapella.gpi.ru, [b]sidorov@kapella.gpi.ru, [c]lunkov@kapella.gpi.ru, [d]petniko@kapella.gpi.ru

In the framework of numerical modeling, errors in determining the distance between a sound source and receiver based on the propagation time of an acoustic signal in the frequency band of 2–4 kHz over a 10-km range were estimated in the presence of a train of three soliton-like internal waves with amplitudes of 10, 26, and 40 m. The model parameters corresponded to the hydrological conditions of the southern Kara Sea in the summer period. It is shown that the error in range measurement can reach more than a hundred meters, depending on the receiver depth and the direction of internal wave propagation (along or across the path). The largest errors occur during transverse propagation of the

wave train. The results are important for the development of underwater acoustic navigation systems on the Russian Arctic shelf.

Keywords: underwater acoustic distance measurement, internal wave solitons

PACS: 43.30. –k, 43.30 +m

Введение

Точность определения расстояния между подводными источником (акустическим маяком) и приемником звука по времени распространения сигнала зависит от множества факторов. Среди них выделяются квазислучайные возмущения среды, например, цуги внутренних волн (ВВ) большой амплитуды [1]. Такие возмущения труднопредсказуемы и существенно зависят от гидрологических условий и рельефа дна каждой акватории. Их наличие приводит к флуктуациям времени распространения акустических сигналов и, соответственно, к погрешностям при определении расстояния.

Для оценки этих погрешностей в настоящей работе в рамках численного моделирования проанализированы возможные ошибки при определении расстояния между источником и приемником звука в южной, мелководной части Карского моря в летний период в присутствии указанных волновых цугов.

1 Методика и параметры численного моделирования

1.1 Моделирование возмущений

Для численного моделирования выбрана трехслойная приближенная модель волновода с постоянными температурой и соленостью в верхнем и нижнем слоях толщиной H_1 и H_2, соответственно, и их линейным изменением в слое скачка. Исходные данные получены из всемирной базы океанологических данных World Ocean Database (рис.1). Скачок плотности $\rho(z)$ между слоями, где z – глубина, создает условия для существования интенсивных ВВ, наличие которых в Карском море подтверждено экспериментально [2]. При численных оценках характеристик ВВ использовано приближение двухслойной жидкости.

Моделирование ВВ выполнялось для цуга из трех модельных солитонов Кортевега–де Вриза (КдВ) с амплитудами в слое скачка D_i = 10, 26 и 40 м, где i – номер солитона в цуге. Солитоны с такими амплитудами наблюдались в летнее время года в Карском море [3].

Синхронные по глубине смещения жидкости $\xi(x,z,t)$, вызванные солитонами КдВ, описывались выражением [4]:

$$\xi(x,z,t) = -\zeta(z)\sum_{i=1}^{3} D_i\left(\operatorname{sech}\left[\frac{(x - c_i t - x_{i0})}{L_i}\right]\right)^2$$

где x – текущая горизонтальная координата вдоль акустической трассы от источника к приемнику звука, x_{i0} – горизонтальная координата вершины солитона в начальный момент времени, $\zeta(z)$ – первая волноводная мода ВВ, c_i – скорость солитона: $c_i = c_0\left(1 + \frac{1}{2}\frac{\mathrm{A}_i \Delta H}{H_1 H_2}\right)$, c_0 – скорость линейной ВВ в двухслойной жидкости: $c_0 = \sqrt{g' H_1 H_2 (H_1 + H_2)}$, $g' = g\,\Delta\rho/\bar{\rho}$, g – ускорение свободного падения, $\Delta\rho = \rho_1 - \rho_2$, ρ_1и ρ_2 плотности морской воды в верхнем и нижнем слое, $\bar{\rho}$ – средняя плотность, $\Delta H = H_2 - H_1$, L_i – полуширина солитона: $\underline{L_i = 2H_1H_2/\sqrt{3D_i\Delta H}}$. Глубина волновода равнялась H = 100 м. Для солитона КдВ с амплитудой $D_3 = 40$ м параметры c_3 и L_3 равны 0.8 м/с и 40.2 м, соответственно. Нормированная функция $\zeta(z)$ рассчитывалась для частоты ≈ 5 ц/ч. Вызванные цугом возмущения профиля скорости звука вдоль акустической трассы представлены на рис. 2.

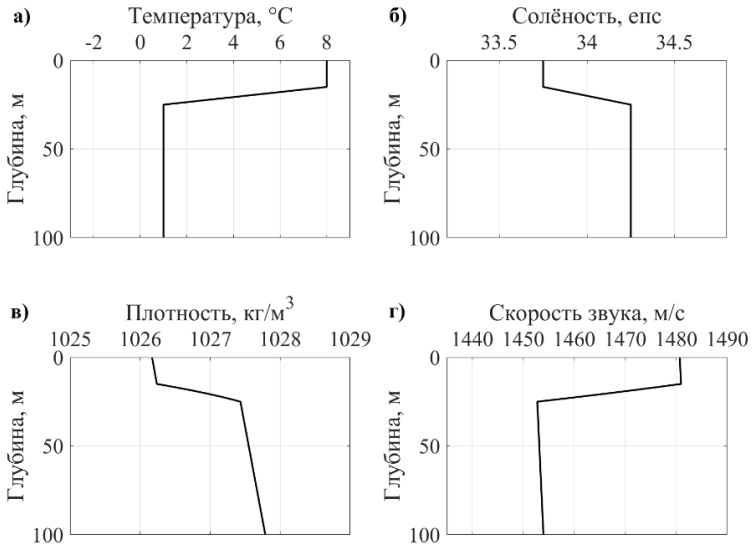


Рис. 1. Модельные зависимости: а) температуры, б) солености, в) плотности, г) скорости звука от глубины.

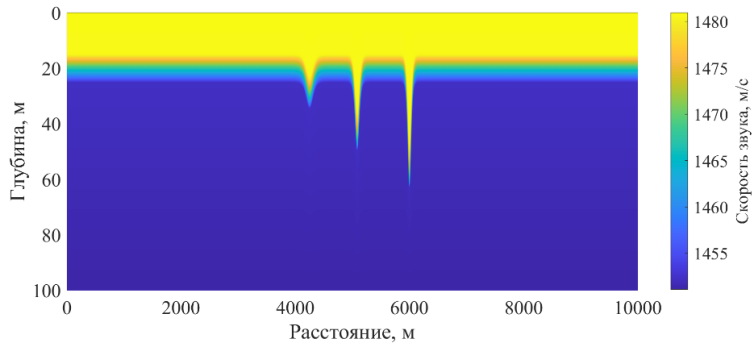


Рис. 2. Возмущенное цугом солитонов поле скорости звука.

1.2 Моделирование распространения звука

Моделировалось распространение ЛЧМ-сигнала $s_0(t)$ между источником и приемником звука в полосе частот 2-4 кГц длительностью 1 с. Время распространения t_p определялось по сигналу на выходе оптимального корреляционного приемника,

вычисляющего огибающую корреляционной функции $A(r, z_s, z_r, \tau)$ между излученным сигналом $s_0(t)$ и модельным сигналом $s(r, z_s, z_r, t)$, прошедшим волновод, где z_s и z_r глубины расположения источника и приемника звука, соответственно. Полученная функция $A(r, z_s, z_r, \tau)$ сравнивалась с $B(\tau)$ – огибающей автокорреляционной функции излученного сигнала (предварительно сглаженного окном Хэннинга). Разница t_p во временах наблюдения максимумов для функций $A(r, z_s, z_r, \tau)$ и $B(\tau)$ равнялась времени распространения t_p акустического сигнала, используемого при дальнометрии.

Сигнал $s(r, z_s, z_r, t)$, определялся как свертка излучаемого сигнала и импульсной характеристики, которая вычислялась через обратное преобразование Фурье от передаточной функции $P(r, z_s, z_r\omega)$ изучаемых акустических волноводов без ВВ и при их наличии. Передаточная функция акустического волновода вычислялась с применением широкоугольного параболического уравнения [5].

Параметры дна изменялись с глубиной по линейному закону: плотность ρ_b = 1600-1700 кг/м^3, скорость продольных волн c_b =1800-1850 м/с, затухание продольных волн β_b= 0.33-1 дБ/λ (λ – длина акустической волны). Толщина слоя донных осадков составляла 30 м. Ниже этого слоя параметры дна брались не зависящими от глубины.

2 Результаты численного моделирования

Рассматривалось движение цуга вдоль и поперек акустической трассы. При анализе поперечного движения предполагалось, что ширина фазового фронта ВВ превышает длину трассы. Источник и приемник располагались вблизи дна на глубине $z_s = z_r = 95$ м. На рис. 3, а, б, в, представлены нормированные на максимум сигналы на выходе оптимального корреляционного приемника, демонстрирующие мультиимпульсную структуру, обусловленную волноводным распространением звука. Более детально структура поля в вертикальной плоскости показана на рис. 3, г, д, е, в логарифмическом масштабе. В присутствии ВВ искажения принимаемых сигналов становятся более выраженными.

При подводной акустической дальнометрии время распространения t_p обычно определяется по моменту регистрации импульса с наибольшей амплитудой в принятом сигнале (рис. 3, а-в). Ошибка при определении расстояния вычисляется по формуле:

$$\delta r = r - c_{\text{eff}}\, t_p(r, t),$$

где эффективная скорость c_{eff} принимается равной скорости звука на глубине источника (рис. 1, г), $c_{\text{eff}} = 1451.2$ м/с. Присутствие ВВ на трассе распространения звука в случае расположения источника и приемника вблизи дна слабо влияет на изменение δr, но при изменении глубины приемника точность дальнометрии существенно ухудшается (рис. 4). Так,

при поперечном распространении солитоноподобной ВВ и расположении приемника вблизи термоклина или выше него t_p уменьшается на 0.1 с ($\delta r \approx 145$ м). В отсутствие ВВ при расположении приемника над слоем скачка t_p, напротив, увеличивается на 0.05 с ($\delta r \approx 72.5$ м). Такие вариации обусловлены волноводным распространением звука. При этом выбранное значение c_{eff} вносит систематическую погрешность [6], которая в данных условиях на расстоянии 10 км составляет 15 м.

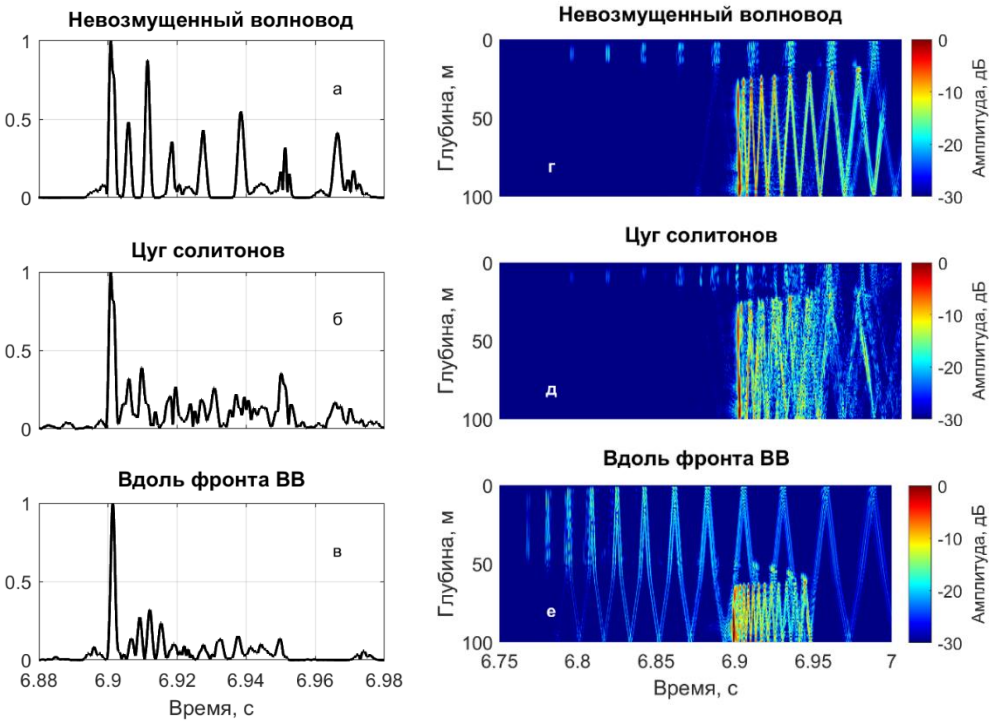


Рис. 3. Сигналы с выхода оптимального корреляционного приемника на расстоянии 10 км и амплитуды принимаемых импульсных сигналов: а, г) в отсутствии ВВ, б, д) цуг солитоноподобных ВВ движется от источника к приемнику звука, в, е) солитон с амплитудой 40 м (см. рис. 2) движется поперёк и занимает всю акустическую трассу.

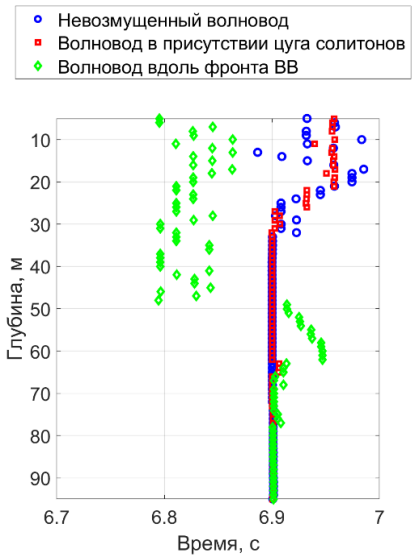


Рис. 4. Время прихода сигналов на расстоянии 10 км при различной глубине приемника. Синие кружки – времена прихода для невозмущенного волновода, красные квадраты – для волновода в присутствии цуга солитонов, зеленые ромбы – для волновода вдоль фронта солитона с наибольшей амплитудой.

Заключение

Исходя из полученных результатов, интенсивные солитоноподобные внутренние волны в южной части Карского моря практически не влияют на точность акустической дальнометрии в летний период при расположении акустического маяка и приемника звука в придонном слое. Однако их влияние становится значимым при подъеме приемника к слою скачка плотности и выше. Можно предположить, что аналогичные ошибки при определении расстояния будут характерны и для других арктических морей России, где взаимодействие приливных течений с топографией дна и нелинейные процессы разрушения внутренних приливов создают условия для генерации интенсивных внутренних волн, а пикноклин присутствует и в летний, и в зимний гидрологические сезоны.

Источник финансирования. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-22-00262. https://rscf.ru/project/25-22-00262/

Список литературы

1. *Кацнельсон Б.Г., Переселков С.А., Петников В.Г., Сабинин К.Д., Серебряный А.Н.* Акустические эффекты, обусловленные интенсивными внутренними волнами на шельфе. // Акуст. журн. 2001. **47**, № 4. С. 494.

2. Поверхностные и внутренние волны в арктических морях. Под ред. И. В. Лавренова, Е. Г. Морозова. СПб.: Гидрометеоиздат, 2002.

3. *Kozlov I., Kopyshov I., Frey D., Morozov E., Medvedev I., Shiryborova A., Silvestrova K., Gavrikov A., Ezhova E., Soloviev D.,* et al. Multi-Sensor Observations Reveal Large-Amplitude Nonlinear Internal Waves in the Kara Gates, Arctic Ocean. // Remote Sens. 2023. **15**, N 24. P. 5769.

4. *Коняев К.В., Сабинин К.Д.* Волны внутри океана. Гидрометеоиздат. СПб., 1992.

5. *Collins M.* A self-starter for the parabolic equation method. // J. Acoust. Soc. Am. 1992. **92**, N 4. P. 2069.

6. *Сидоров Д.Д., Петников В.Г.* О влиянии свойств дна при акустической дальнометрии на мелководном арктическом шельфе // Акуст. Журн. 2025. **71**. № 3. С. 406.

УДК: 534.873 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39443

Пространственная изменчивость модовой структуры широкополосного звукового поля в мелком море при наличии термоклина и неровностей дна

Сидоров Д.Д. [1,a], Шепель И.А. [1,b], Шерменева М.А. [1,c], Луньков А.А. [1,d]

[1] *Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, ул. Вавилова 38, Москва, 119991 Россия*

E-mail: [a]sidorov@kapella.gpi.ru, [b]mr-shepel13@yandex.ru, [c]shermeneva@mail.ru, [d]lunkov@kapella.gpi.ru

В рамках численного моделирования исследуется пространственная эволюция модовой структуры звукового поля в широкой полосе частот в мелководном волноводе с неоднородностями рельефа дна при наличии термоклина. Рассматриваются случаи как наклонного дна, так и дна с локальным поднятием дна. Эти неоднородности рельефа приводят к взаимодействию мод, которое усиливается из-за присутствия термоклина, формирующего придонный канал. Моделирование акустических полей проводится в декадной полосе частот от 200 до 2000 Гц методом широкоугольного параболического уравнения без учета трехмерных эффектов. Анализ модовой структуры производится с помощью фильтрации отдельных мод на вертикальной антенне, перегораживающей водный слой по всей глубине. Выявлены пространственные изменения частотных зависимостей модовых амплитуд и фаз, а также частотно-временных структур отдельных мод. Полученные в настоящей работе результаты могут быть использованы для развития методов дистанционного акустического зондирования прибрежных районов Мирового океана со сложной структурой рельефа дна.

Ключевые слова: акустика мелкого моря, нормальные волны (моды), межмодовое взаимодействие, термоклин, неровности дна, широкоугольное параболическое уравнение

Spatial Variability of the Modal Structure of a Broadband Sound Field in a Shallow Sea with a Thermocline and Bottom Irregularities

D.D. Sidorov[1,a], I.A. Shepel[1,b], M.A. Shermeneva[1,c], A.A. Lunkov[1,d]

[1] *Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences. Moscow 119991, Russia.*

E-mail: [a]sidorov@kapella.gpi.ru, [b]mr-shepel13@yandex.ru, [c]shermeneva@mail.ru, [d]lunkov@kapella.gpi.ru

Within the framework of numerical simulation, the spatial evolution of the modal structure of a sound field in a wide frequency band is investigated in a shallow-water waveguide with bottom topography

inhomogeneities in the presence of a thermocline. Both a sloping bottom and a bottom with a local elevation are considered. These bottom irregularities lead to mode coupling, which is enhanced by the presence of a thermocline forming a near-bottom channel. Acoustic field simulations are performed in a decade frequency band from 200 to 2000 Hz using the wide-angle parabolic equation method, neglecting three-dimensional effects. The modal structure is analyzed by filtering individual modes on a vertical array spanning the entire water column. Spatial variations in the frequency dependence of mode amplitudes and phases, as well as the frequency-time structures of individual modes, are revealed. The results obtained in this study can be used for the development of remote acoustic sensing techniques in coastal regions of the World Ocean with complex bottom topography.
Keywords: shallow-water acoustics, normal modes, mode coupling, thermocline, bottom irregularities, wide-angle parabolic equation

PACS: 43.30. –k, 43.30 +m

Введение

Изучение закономерностей формирования широкополосных акустических полей в мелком море имеет важное значение для развития методов диагностики морской среды. Особый интерес представляет пространственная эволюция звукового поля при распространении в волноводах с неоднородностями рельефа дна: протяженными (береговой клин) и сосредоточенными (локальное поднятие дна) – в присутствии стратифицированного водного слоя, обусловленного наличием термоклина. Оба сценария часто встречаются в прибрежных мелководных районах Мирового океана. В натурных экспериментах анализ полного поля зачастую затруднен, поэтому перспективным подходом является разложение поля на отдельные составляющие, волноводные моды. Ранее было показано, что присутствие неоднородностей различного типа приводит к формированию характерных частотно-временных зависимостей мод [1]. В настоящей работе на основе численного моделирования исследуется эволюция модовой структуры широкополосного звукового поля в диапазоне частот 0.2–2.0 кГц в мелководном волноводе с неоднородным рельефом дна (наклонное дно и локальное поднятие) при наличии термоклина.

1 Параметры моделей волновода и методика анализа нормальных волн

1.1 Модель с наклонным дном

Рассматривается наклонное дно с плавным переходом в сторону увеличения глубины от $H_0 = 10$ м до 40 м на протяжении 5000 м ($H(r) = H_0 + 0.006r$). Типичный профиль скорости звука в водном слое задается выражением

$$c(z) = c_0 - \frac{2\Delta c(z - z_{th})}{\pi}, \quad (1)$$

где $c_0 = 1500$ м/с – средняя скорость звука в воде, $\Delta c = 20$ м/с – разность скоростей звука у поверхности дна, $z_{th} = 15$ м – глубина термоклина. Дно представляет собой жидкую среду со скоростью звука $c_b = 350$ м/с и затуханием 0.33 дБ/λ. Источник располагается на глубине $z_s = 7$ м. На расстояниях от 500 до 2700 м от источника (вниз по склону) помещается вертикальная цепочка гидрофонов, перегораживающая весь водный слой по глубине и используемая для выделения отдельных волноводных мод из полного поля.

1.2 Модель с локальным поднятием дна

В рамках модели с локальным поднятием дна используются натурные данные (профиль дна и профиль скорости звука в воде), полученные в ходе эксперимента в заливе Посьета Японского моря (см. рис. 1). Заметно, что глубина дна значительно меняется по трассе, но наиболее выраженной неоднородностью является горка. Протяженность трассы составляет 2000 м со средней глубиной ≈ 35 м. Во время измерений на глубине 20 м наблюдался термоклин, но в отличие от предыдущий модели разность скоростей звука между придонным слоем и приповерхностным составляла 40 м/с. Здесь источник располагался на глубине 34 м. Для модового анализа предложено рассмотреть два положения вертикальной приемной антенны: 800 м (до локального поднятия дна) и 2000 м (в конце акустической трассы).

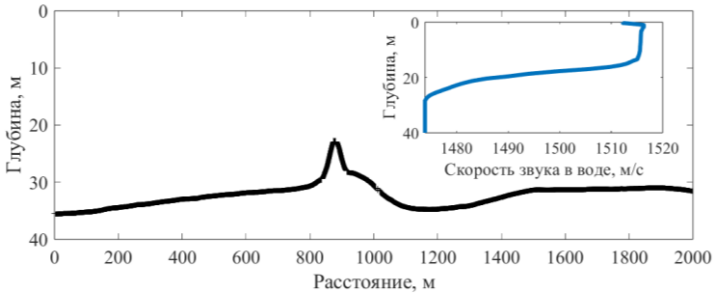


Рис. 1. Рельеф дна по трассе, полученный в ходе эхолоцирования, и вертикальный профиль скорости звука – результат CTD зонидрования.

1.3 Анализ модовой структуры

Акустическое поле для обеих моделей рассчитывалось с помощью метода широкоугольного параболического уравнения (код RAM). Для выделения отдельных мод использовалось условие их ортогональности [2]. Амплитуда моды может быть получена, как

$$P_l(\omega, r) \approx \int_0^H p(\omega, r, z)\Psi_l(\omega, r, z)dz\,, \quad (2)$$

где $P_l(\omega, r)$ – амплитуда моды с номером l, $p(\omega, r, z)$ – комплексное поле звукового давления, $\Psi_l(\omega, r, z)$ – вертикальные профили мод. Расчет профилей мод осуществлялся с помощью программы KRAKENC.

2 Результаты численного моделирования

2.1 Модель с наклонным дном

В отсутствие термоклина, когда взаимодействие мод обусловлено небольшим наклоном дна, пространственно-частотная структура амплитуды первой моды хорошо описывается аналитическим выражением (см. белые кривые на рис. 2),

$$f(r) = \frac{3c_w r}{4H_0(H_0 + \alpha r)\left(2n + \frac{1}{2}\right)}, \quad (3)$$

связывающим положение максимумов амплитуды первой моды с расстоянием и частотой. Здесь $\alpha = 0.006$ наклон дна, n – номер максимума. При наличии термоклина на расстоянии, где глубина термоклина ($z_{\text{th}} = 15$ м) совпадает с глубиной дна (~ 835 м), наблюдается нарушение регулярной структуры максимумов (см. рис. 2б), что свидетельствует об усилении межмодового взаимодействия. Совместное влияние наклонного дна и термоклина приводит к перераспределению энергии между модами и изменению характера частотной зависимости амплитуд.

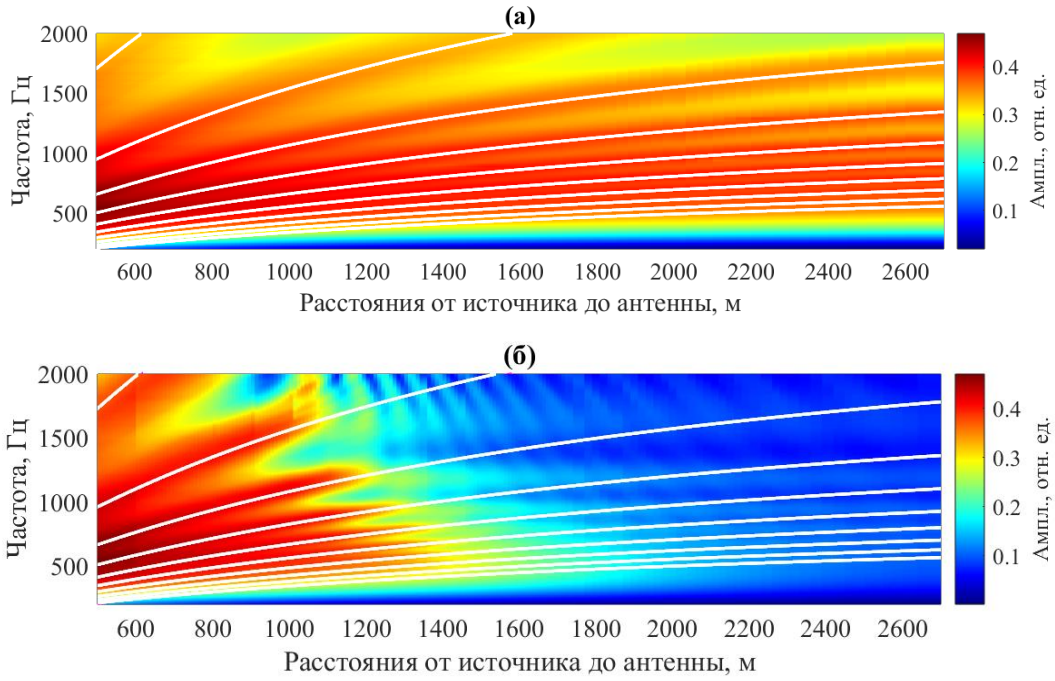


Рис. 2. Пространственно-частотная структура первой моды в волноводе: (а) с постоянной скоростью звука в воде, (б) при наличии термоклина. Белыми линиями изображены аналитические зависимости $f(r)$.

2.2 Модель с локальным поднятием дна

Присутствие термоклина в волноводе приводит к разделению мод на две группы: придонные и донно-поверхностные. Придонные моды демонстрируют повышенную чувствительность к неровностям рельефа, что проявляется в их существенном затухании после прохождения локального поднятия дна (см. рис. 3а – до локального поднятия дна, рис. 3б -

после). Помимо амплитудных, зафиксированы скачкообразные изменения разности фаз между первой и второй модами ($\Delta\phi = \arg(P_2/P_1)$) в зависимости от частоты (рис. 4).

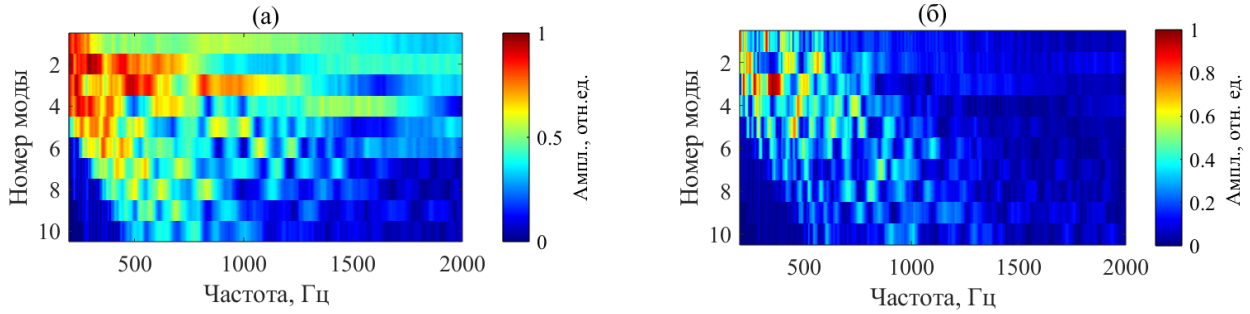


Рис. 3 Нормированные амплитуды 10 мод до неоднородности (на расстоянии 800 м от источника на рис. 1) и в конце трассы (2000 м).

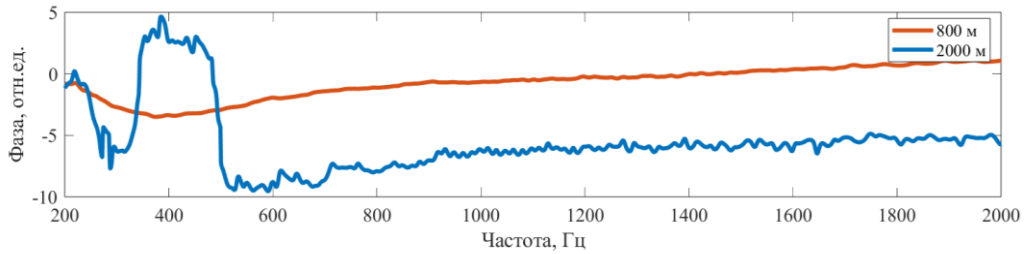


Рис. 4. Разность фаз первых двух волноводных мод: красная кривая - до неоднородности (на расстоянии 800 м от источника на рис. 1) и синяя – в конце трассы (2000 м).

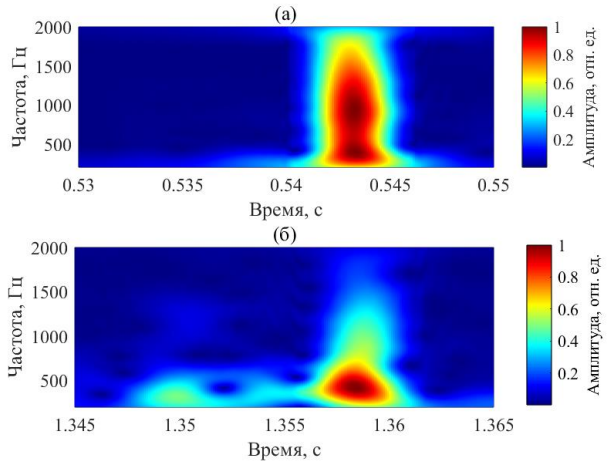


Рис. 5 Нормированные спектрограммы первой моды: (а) до неоднородности (на расстоянии 800 м от источника на рис. 1), (б) в конце трассы (2000 м).

На частотно-временных представлениях (спектрограммах) первой моды после прохождения неоднородности наблюдаются дополнительные максимумы (см. рис. 5б), приходящие раньше основного сигнала. Появление этих ранних приходов связано с трансфером энергии от высших (более быстрых) мод к низшим в результате межмодового взаимодействия на локальном поднятии дна. Данная особенность позволяет локализовывать

положение неоднородности на трассе. В отсутствие термоклина, когда скорость распространения мод убывает с ростом номера моды, на спектрограммах, напротив, фиксируются более поздние приходы по сравнению с основным. В таком случае трудность локализации неоднородности может быть обусловлена наложением отражённых сигналов. Отмечено, что изменения модовой структуры сохраняются и после прохождения неоднородности, что указывает на возможность их использования для диагностики параметров среды.

Заключение

В работе исследована пространственная эволюция модовой структуры широкополосного звукового поля в мелководном волноводе с неоднородным рельефом дна и термоклином. Установлено, что протяженные и локальные изменения глубины волновода приводят к перераспределению энергии между модами, осцилляциям их амплитуд и изменению разности фаз между соседними модами. Анализ частотно-временных структур показал появление дополнительных максимумов после прохождения неоднородности, обусловленное трансфером энергии от высших мод к низшим. Полученные результаты могут быть использованы для развития методов дистанционного акустического зондирования прибрежных районов Мирового океана со сложным рельефом дна.

Источник финансирования. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-72-10121-П.

https://rscf.ru/project/tuwTgU_rZlAQgbw5qs4GO7HjoVGeB9Ey_47DIsK4P65iauZqCshq8wKpUqoAnuRpnm7mAfZju7s~/.

Список литературы

1. *Луньков А.А., Шерменева М.А., Сидоров Д.Д., Ужанский Э.М., Кацнельсон Б.Г., Ковзель Д.Г., Безответных В.В.* Взаимодействие мод широкополосного звукового поля в мелководном волноводе с локальными неоднородностями: теория, моделирование, эксперимент. // Акуст. журн. 2025. **71**. № S5. С. 17.
2. *Katsnelson B., Petnikov V., Lynch J.* Fundamentals of Shallow Water Acoustics. – New York: Springer, 2012. – 335 p.

УДК: 551.463.21+534.23 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39444

НЕКОТОРЫЕ ОЦЕНКИ ПРИПОВЕРХНОСТНОГО ЗВУКОВОГО КАНАЛА ПО ДАННЫМ ЭЛЕКТРОННЫХ РЕСУРСОВ

К.П. Львов, В.С. Цыбин

АО «Концерн «Океанприбор», Россия, 197176, Санкт-Петербург, Чкаловский пр., д. 46

E-mail: k.lwow@mail.ru

Аннотация: Приводятся результаты вычислительного эксперимента, который выполнен из соображений практической значимости. Использованы общедоступные данные термохалинных полей. Приведена таблица, содержащая координаты «станций» районов, источники данных термохалинных полей, расчетные значения скорости звука на поверхности и толщин приповерхностных звуковых каналов. В таблице также размещены различные оценки глубины верхнего квазиоднородного слоя «станций» по данным профилей буев Argo по 2022 г.

Ключевые слова: термохалинные поля, скорость звука, толщина, верхний квазиоднородный слой, буи Argo

SOME ESTIMATES OF THE SURFACE SOUND CHANNEL ACCORDING TO ELECTRONIC RESOURCES

K.P. Lvov, V.S. Tsybin

JSC «Concern «Oceanpribor », Chkalovsky pr., 46, Saint-Petersburg, 197176, Russia
E-mail: k.lwow@mail.ru

Abstract: Results of computing experiment which is executed from reasons of the practical importance are given. Public data of thermohaline fields are used. The table containing coordinates of "stations" of areas, data sources of thermohaline fields, calculated values of speed of a sound on a surface and depth of surface sound channels is provided. In the table various estimates of depth of the top quasihomogeneous layer of "stations" according to profiles of buoys of Argo 2022 are also placed.

Keywords: thermohaline fields, speed of a sound, depth, top quasihomogeneous layer, Argo

PACS: 43.20.EI, 43.30.+m, 43.25.Ed

Введение

В океанографии рассматриваются характеристики верхнего квазиоднородного слоя (ВКС), когда из-за перемешивания наблюдается примерное постоянство температуры и солености. В северных широтах (40…50^0 с.ш.) глубина залегания ВКС зависит от времени года. В умеренно-тропическом районе более слабая зависимость от сезона. В условиях глубокого моря ВКС приводит к образованию приповерхностного звукового канала (ППЗК).

В прикладной гидроакустике рассматривают шумовой источник звука, находящийся в ВКС и приемник с вертикальной антенной решеткой. Но в приводимых примерах вертикального распределения скорости звука (ВРСЗ) отсутствует ППЗК [1 - 3 и цитируемые там работы].

В настоящее время общедоступны электронные ресурсы термохалинных полей Мирового океана последних десятилетий и текущих дат, позволяющие оценивать расчетным путем ППЗК. Также общедоступны оценки толщины ВКС по данным профилей буев Argo.

Целью работы является приведение результатов вычислительного эксперимента исследования ППЗК по общедоступным данным термохалинных полей Гидрометцентра за 2025 г., электронного атласа Мирового океана и толщин ВКС по данным профилей буев Argo.

Исходные данные

В Гидрометцентре России (ГМЦ) функционирует система усвоения океанографических данных (СУОД). Ежедневные выходные данные выкладываются на общедоступных электронных ресурсах. В каталоге дня размещаются сжатые файлы с данными термохалинных полей - потенциальная температура и практическая солёность по глубине и координатам [4]. В работе использованы данные январь – декабрь 2025 г.

Общедоступен электронный атлас Мирового океана World Ocean Atlas, релиз от февраля 2024 г, (WOA23), содержащий климатические термохалинные поля. Атлас содержит, например, объективно проанализированные средние значения полей (Objectively analyzed mean fields …) температуры и солености по месяцам и сезонам по квадратам в четверть градуса широты и долготы. Атлас содержит данные для 12 временных периодов (Time Spans). Использованы средние значения полей наиболее близкий к настоящему времени (март 2026 г.) период 2015–2022 гг. (8 year «decade», аббревиатура B5C2) [5].

Пересчет потенциальной температуры данных СУОД в in situ температуру производился по формулам Международного состояния морской воды TEOS-10 библиотеки

MATLAB_V3.o6 (2009). Расчеты ВРСЗ по данным термохалинных полей СУОД и WOA23 производились по широко известной формуле Чена и Миллера (1977).

В работах [6, 7] рассмотрены различные алгоритмы климатических помесячно оценок толщин ВКС Мирового океана по данным буев Argo 2000-2022 гг с дискретностью по широте и долготе в 1°. Для каждого профиля Argo толщина ВКС определяется по критерию разности плотностей как функции температуры, солености и давления по формулам TEOS-10. Климатические помесячно оценки толщин ВКС являются результатом осреднения толщин профилей. Оценки толщин – средние, 5-ти, 95-ти процентили, медианы (50-ти процентили) и максимальные значения. В [6, 7] приведены общедоступные ссылки на электронные ресурсы оценок. По данным ссылки в [6] общее число обработанных профилей данных буев Argo равно 2.480.040.

Расчетные оценки

АКИН многие годы проводил натурные эксперименты в различных районах Мирового океана. Некоторые результаты исследования распространения звука в ППЗК опубликованы в Акустическом журнале [8, 9]. Для расчетов были выбраны районы согласно [8, 9 и цитируемые там работы].

Результаты вычислительного эксперимента приведены для 12 «станций» в таблице 1. Данные термохалинных полей WOA23 помесячные, СУОД – 15 число соответствующего месяца.

Координаты соответствуют районам : 24^0 N; 27^0 W – Канарская котловина, 40^0 N; 12^0 W – Иберийская котловина, 19^0 N; 150^0 E – Гавайские острова, 6^0 S; 80^0 E – Индийский океан, 72^0 N; 10^0 W – Гренландское море, 65^0 N; 2^0 W – Норвежское море, 5^0 N; 39^0 W – Гвиана, Атлантический океан, 43^0 N; 8^0 E – Средиземное море, 52^0 N; 170^0 E – Берингово море, 30^0 N; 145^0 E – Тихий океан, 43^0 N; 32^0 E – Черное море, 42^0 N; 137^0 E – Японское море. Приняты следующие сокращения. Расчетные значения скорости звука на поверхности c, м/с и толщина d, м ППЗК.

Средняя толщина <d>, 5-й процентиль P_5, 50-й процентиль (медиана), 95-й процентиль P_{95} и максимальная толщина max ВКС согласно данным ссылок в [6, 7].

Таблица 1

Расчетные значения ППЗК

Координаты		24^0 N; 27^0 W	40^0 N; 12^0 W	19^0 N; 150^0 E	6^0 S; 80^0 E	72^0 N; 10^0 W	65^0 N; 2^0 W
Месяц		2	3	3	6	11	12
СУОД,[4]	c, м/с	1531	1509	1540	1543	1452	1478
	d, м	120	87	100	31	70	97
WOA23, [5]	c, м/с	1528	1506	1537	1543	1454	1475
	d, м	100	95	50	25	75	85
ARGO, [6]	<d> ,м	98	124	35	35	21	88
	P_{50}, м	91	148	35	36	21	86
	max, м	138	168	42	48	28	112
ARGO, [7]	<d>, м	91	93	41	35	52	102
	P_5, м	19	17	14	16	18	26
	P_{50}, м	97	86	34	34	50	99
	P_{95}, м	155	200	97	59	101	186

Продолжение таблицы 1

Расчетные значения ППЗК

Координаты		5^0 N; 39^0 W	43^0 N; 8^0 E	52^0 N; 170^0 E	30^0 N; 145^0 E	43^0 N; 32^0 E	42^0 N; 137^0 E
Месяц		2	12	12	10	1	12
СУОД, [4]	c, м/с	1541	1510	1467	1541	1472	1489
	d, м	54	23	78	31	54	87
WOA23, [5]	c, м/с	1541	1512	1467	1540	1467	1477
	d, м с	75	25	75	25	40	35
ARGO, [6]	<d>,м	84	44	82	39	39	60
	P_{50}, м	83	42	81	40	43	55
	max,м	91	96	101	60	45	100
ARGO, [7]	<d>,м	64	41	87	38	41	52
	P_5, м	24	13	49	13	18	21
	P_{50}, м	66	39	90	40	42	51
	P_{95}, м	103	88	111	64	64	88

На рис. 1, как пример, в двух масштабах по глубине ВРСЗ «станции» в Иберийской котловине по данным СУОД и WOA23. ВРСЗ, помимо ППЗК, характеризуется двумя подводными звуковыми каналами [9].

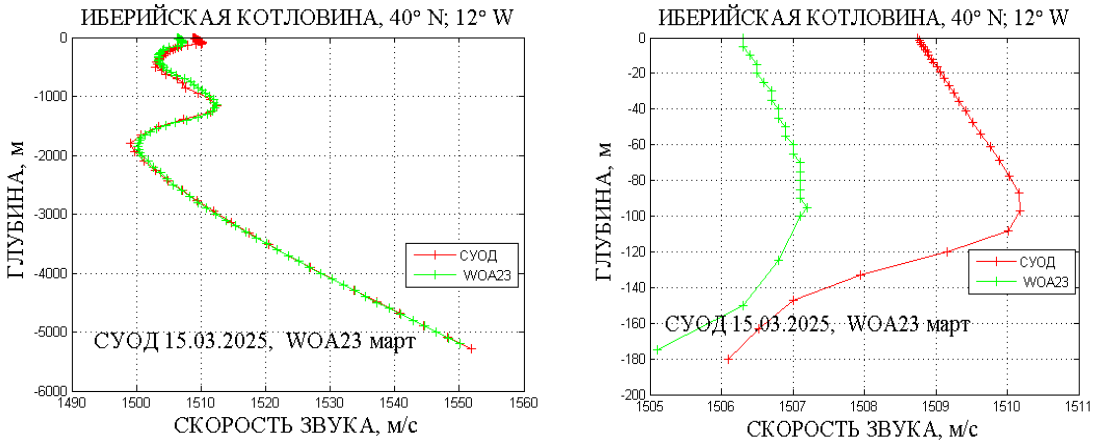


Рис. 1. ВРСЗ «станции» в Иберийской котловине.

Заключение

Расчетные оценки толщин ППЗК и ВКС вариабельны. В районах Канарской котловины, Индийского океана, Гвианы вариабельность минимальна, а наибольшая в районах Гренландского и Норвежского морей.

Скорость звука на поверхности Канарской котловины по сравнению с работой [8] меньше на ≈ 5 м/с. Сравнение с районом Иберийской котловины [9] больше на ≈ 3 м/с, с районом Гвианы больше на ≈ 3 м/с [9]. В указанных работах не приведены месяца экспериментов. Изменение скорости звука в пределах 3 м/с соответствует изменению температуры на 1°С, например, [10].

Градиент скорости звука ППЗК в инженерном приближении равен гидростатическому ≈ 0.017 1/с.

Следует отметить следующее. Согласно результатам вычислительного эксперимента в районах Канарской котловины, Тихого океана (30^0 N; 145^0 E) и Черного моря имеется ППЗК, но в работах [1 - 3] приведены графики ВРСЗ без ППЗК, хотя шумовой источник звука вблизи поверхности. Можно предположить, что проведенные лучевые расчеты с использованием закона Снеллиуса некорректны.

Для конкретного района и даты оценки ППЗК могут быть получены по данным оперативной океанографии, например, [11].

Список литературы

1. *Лободин И.Е., Машошин А.И.* Определение дистанции до подводного источника в условиях дальних зон акустической освещенности // Акустический журнал. 2024. Т. 70. №2. С. 217.
2. *Ермаков С.А., Лободин И.Е.* Оценка возможности использования особенностей структуры гидроакустического поля в дальних зонах акустической освещенности для определения координат и параметров движения шумящих объектов, находящихся у поверхности океана // Гидроакустика 59 (3). 2024. С. 30.
3. *Консон А.Д., Волкова А.А*. Помехоустойчивость пассивного гидролокатора с вертикально развитой антенной при консолидированной обработке сигнала // Гидроакустика 59 (3). 2024. С. 46.
4. *Вильфанд Р.М., Зеленько А.А., Реснянский Ю.Д., Б.С. Струков Б.С., Цырульников М.Д.* Усвоение океанографических данных как одна из ключевых задач оперативной океанологии // Гидроакустика. 2023. Вып. 53 (1). С. 107.
5. https://www.nodc.noaa.gov/OC5/woa23 (дата обращения: 27.11.25).
6. *Holte, J., L. D. Talley, J. Gilson, and D. Roemmich* An Argo mixed layer climatology and database // Geophys. Res. Lett. 44. P. 5618. doi:10.1002/2017GL073426.
7. *Johnson, G. C., & Lyman, J. M.* GOSML: A global ocean surface mixed layer statistical monthly climatology: Means, percentiles, skewness, and kurtosis // Journal of Geophysical Research: Oceans. 127. https://doi.org/10.1029/2021JC018219.
8. *Вадов Р.А*. Распространение звука в приповерхностном канале // Акустический журнал. 2006. Т. 52. № 1. С. 10.
9. *Швачко Л.В*. Исследование структуры звукового поля в приповерхностном канале // Акустический журнал. 2009. Том 55. № 6. С. 737.
10. *Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П.* Теоретические основы акустики океана. Наука. М., 2007.
11. *Коваленко В.В., Селезнев И.А.* Оперативная океанография в интересах акустического подводного наблюдения // Гидроакустика. 2023. Вып. 53 (1). С. 89.

УДК: 534.2 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39445

Трансформация низкочастотных импульсных сигналов в нерегулярном геоакустическом волноводе с водоподобным участком дна

Д.С. Манульчев[1,2], Д.Д. Сидоров[1], А.А. Луньков[1]

[1] Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва;
[2] Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток;
Тел.: +7 (423) 231-14-00; Факс: +7 (423) 231-19-05; E-mail: manulchevds@gmail.com

Аннотация: Показаны особенности распространения низкочастотных импульсных сигналов на мелководном шельфе в нерегулярном геоакустическом волноводе, содержащем выраженные пространственные неоднородности дна в виде участков со скоростью звука от 1326 м/с (т.е. меньшей или сравнимой со скоростью звука в водном слое) на горизонтах до 200 м при глубине моря около 30 м. Аномальные участки имеют солитоноподобную или протяженную форму. Для описания аномалий уточняется критерий водоподобности дна, основанный на модовом представлении акустического поля, который определяет интервал скоростей звука в донных осадках, соответствующий данному типу дна. Его нижняя граница отвечает максимуму затухания первой акустической моды, а верхняя — условию её перехода из класса вытекающих в класс распространяющихся. Показано, что с ростом частоты диапазон скоростей в дне, классифицируемых как водоподобные, сужается. По результатам сравнения экспериментальных акустических сигналов, формируемых перед аномальным участком и после него, показаны трансформации формы импульса и потери его энергии, вызванные прохождением над таким участком. Полученные результаты важны для корректного прогнозирования уровней акустических полей при влиянии донных неоднородностей на дальнее распространение звука в мелководных волноводах.

Ключевые слова: низкочастотный сигнал, водоподобное дно, акустические моды, сейсморазведка.

Low-Frequency Pulse Signal Transformation in an Irregular Geoacoustic Waveguide with a Water-Like Bottom Layer

D.S. Manulchev[1,2], D.D. Sidorov[1], A.A. Lunkov[1]

[1] Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;
[2] Ilyichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia;
Tel.: +7 (423) 231-14-00; Fax: +7 (423) 231-19-05; E-mail: manulchevds@gmail.com

Abstract: The features of low-frequency pulse signal propagation on a shallow-water shelf in an irregular geoacoustic waveguide containing pronounced spatial bottom inhomogeneities are

presented. These inhomogeneities manifest as regions with sound speeds ranging from 1326 m/s (i.e., lower than or comparable to the sound speed in the water layer) at depths of up to 200 m, with a sea depth of about 30 m. The anomalous regions have either soliton-like or extended shapes. To describe these anomalies, a criterion for water-like bottom is refined, based on the modal representation of the acoustic field, which defines the interval of sound speeds in bottom sediments corresponding to this bottom type. Its lower boundary corresponds to the maximum attenuation of the first acoustic mode, while the upper boundary corresponds to the condition of its transition from the class of leaky modes to the class of propagating modes. It is shown that as frequency increases, the range of bottom sound speeds classified as water-like narrows. Based on a comparison of experimental acoustic signals recorded before and after the anomalous region, the transformations of the pulse shape and the energy losses caused by propagation over such a region are demonstrated. The obtained results are important for correctly predicting acoustic field levels when bottom inhomogeneities affect long-range sound propagation in shallow-water waveguides.

Keywords: low-frequency signal, water-like bottom, acoustic modes, seismic surveying.

PACS: 43.30.-k, 43.30.Bp; 43.30.Ma; 43.30.Re.

Введение

Верхний слой континентального шельфа, состоящий как правило из неконсолидированных осадков, может содержать пространственные неоднородности. В частности, в районах газовых месторождений в дне могут наблюдаться участки с аномальными акустическими свойствами, обусловленными эмиссией природного газа (например, метана) с морского дна. В этом случае поле скорости распространения акустических волн характеризуется повышенной изменчивостью и пространственными образованиями, в которых скорость звука может быть равной или меньше, чем в водном слое. Наличие в волноводе аномальных участков дна может оказывать значительное влияние на условие распространения акустических волн, приводя к дополнительным потерям энергии [1, 2] и к межмодовому взаимодействию [3].

В настоящей работе исследуются особенности распространения низкочастотных акустических сигналов через области с пониженной скоростью продольных волн на основе данных морской сейсморазведки, проведенной на северо-восточном шельфе о. Сахалина в 2015 году [4]. Акустический мониторинг выполнялся автономными подводными акустическими регистраторами, измеряющими у дна вариации акустического давления в диапазоне 2–15000 Гц с динамическим диапазоном 145 дБ. На рис. 1а представлены две акустические трассы равной длины (9.5 км), прием звука осуществлялся у дна на 20-метровой изобате в точке R. Источник в виде массива пневмоизлучателей располагался на горизонте 6

м. Акустическая трасса S1 – R содержит аномальный участок с пониженной скоростью звука, в то время как трасса S4 – R выбрана без донных неоднородностей (см. рис 1б и в). Выбор трасс сделан с учетом необходимости минимизировать влияние на распространение звука таких факторов, как профиль дна, диаграмма направленности сейсмоисточника и комбинации пневмоизлучателей в конфигурации источника. Пространственная оценка поля скорости звука в дне получена на основе геофизических исследований в рассматриваемом районе.

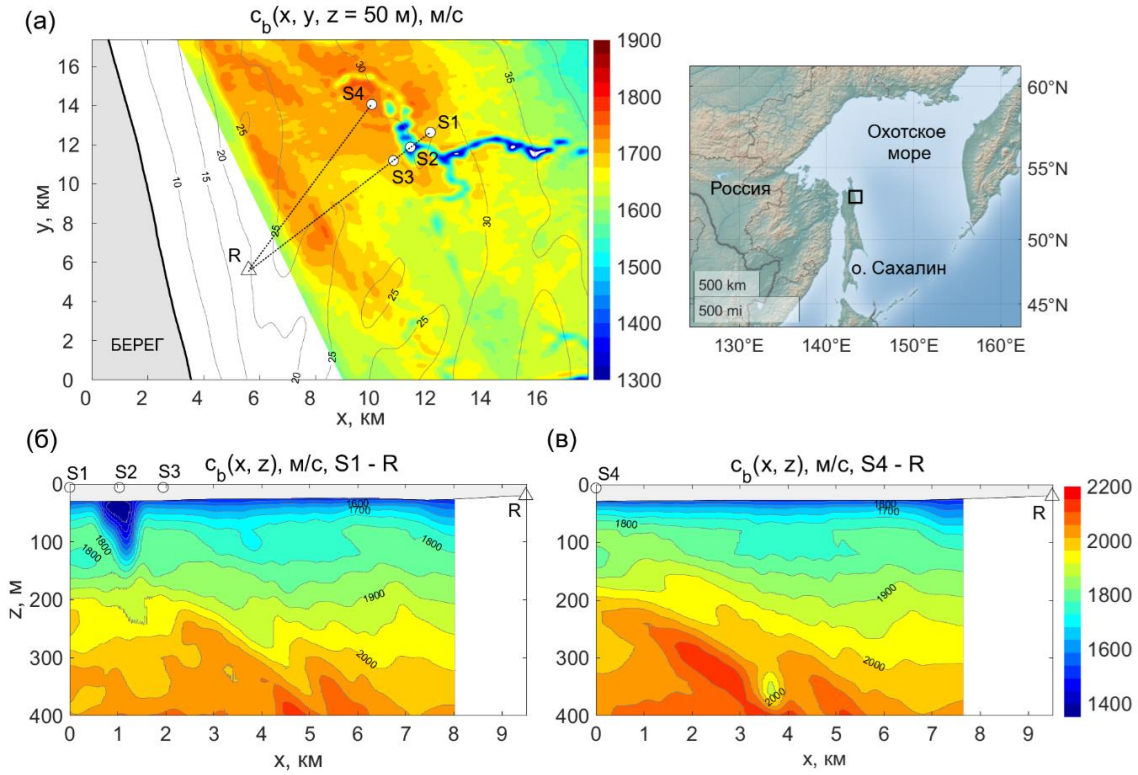


Рис. 1. Карта района исследования с указанием двух акустических трасс, точек излучения S1 – S4, донного акустического регистратора R и горизонтального распределения поля скорости звука продольных волн в дне на горизонте 50 м (а). Вертикальное распределение значений скорости звука в дне для акустических трасс S1 – R (б) и S4 – R (в).

1 Результаты эксперимента

В качестве интегральной энергетической характеристики акустического импульса используется уровень звукового воздействия: $SEL(\Delta f) = 10 \cdot log_{10} \frac{\Delta t \int_{f_1}^{f_2} G(f) df}{p_0^2 \cdot \Delta t_0}$ дБ отн. 1 мкПа^2 с, где $G(f)$ – спектральная плотность мощности сигнала, $\Delta f = f_2 - f_1$ – частотный диапазон, Δt – временной интервал сигнала, $p_0 = 1$ мкПа, $\Delta t_0 = 1$ с. На рис. 2 приведена функция $SEL(x)$ в зависимости от расстояния x до точки приема R для акустических трасс S1 – R (красные кривые) и S4 – R (синие кривые), рассчитанные для трех частотных диапазонов: полная энергия, 10 – 50 Гц и 50 – 350 Гц.

За счет влияния аномального участка на трассе S1 – R в экспериментальных данных наблюдаются потери энергии на 14 дБ по сравнению с трассой S4 – R. При этом вариации параметра SEL до аномального участка для двух трасс не превышает 5 дБ, что объясняется

локальным различием геоакустических параметров трасс (рис. 1 б, в). Согласно графикам разделения SEL на частотные диапазоны, наибольшее влияния донная аномалия оказывает на низкочастотный диапазон, на котором возбуждаются донные и воднодонные моды.

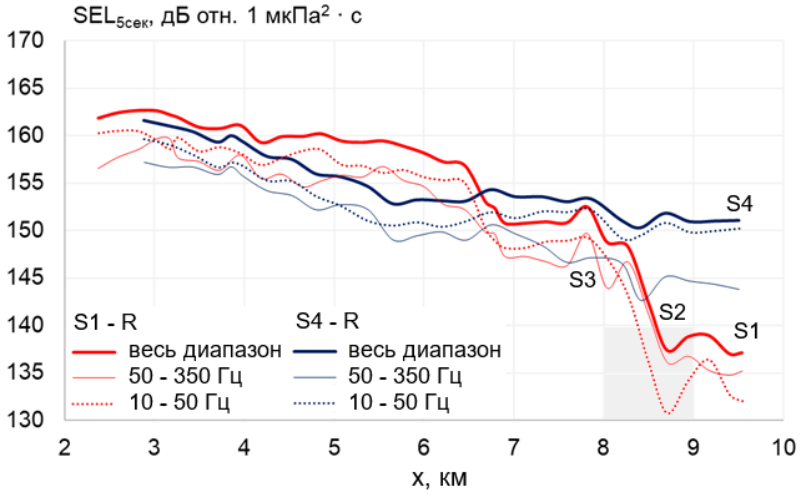


Рис. 2. Зависимость SEL вдоль трасс S1 – R и S4 – R, рассчитанная во временном окне 5 с для трех частотных диапазонов: полный спектр, низкочастотный (10 – 50 Гц) и высокочастотный (50 – 350 Гц).

Структура акустических импульсов при излучении до аномального участка (S1), над ним (S2) и после него (S3), а также рассчитанные по ним графики спектральной плотности мощности представлены на рис. 3. Расстояние между соседними точками излучения не превышает 1 км.

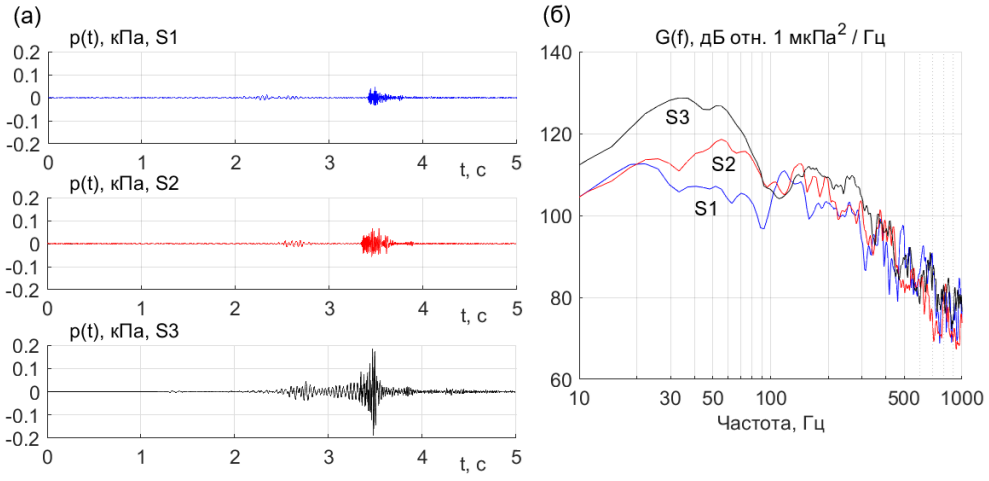


Рис. 3. Вариации акустического давления импульсных сигналов при излучении из точек S1, S2 и S3 акустической трассы S1 – R (а), соответствующие им графики спектральной плотности мощности (б). Представленные сигналы не синхронизированы по времени.

Согласно графикам $G(f)$ на частотах выше 300 Гц аномальный участок не оказывает влияние на распространение звука. При формировании сигнала над аномальным участком и до него потери на частотах 10 – 20 Гц соизмеримы, в то время как на частотах 30 – 90 Гц отличие в уровнях спектра достигают 15 дБ.

2 Критерий водоподобного дна

В работе [5] предложен критерий «водоподобности» участков дна, скорость звука в которых не опускается ниже скорости звука в воде. Представленный подход был апробирован на основе 3D распределения скорости звука в дне Карского моря (1460–1700 м/с), где минимальное значение скорости соответствовало скорости звука в воде. В настоящей работе сейсморазведочные исследования выявили участки дна со скоростью, достигающей 1326 м/с, при которых наблюдается рост потерь. Требуется дополнить имеющийся критерий водоподобности введением нижней границы для скорости звука.

Будем считать дно водоподобным, если средняя скорость звука в верхнем слое дна толщиной λ лежит в интервале $c_{wl}^{\min} < \langle c_b \rangle_\lambda < c_{wl}^{\max}$. Правая граница $c_{wl}^{\max}$ отвечает скорости звука в дне, при котором первая мода становится вытекающей. Для левой границы $c_{wl}^{\min}$ – скорость звука в дне, при которой коэффициент затухания первой моды максимален. В таком случае коэффициент отражения от дна равен нулю, что достигается при углах скольжения θ, удовлетворяющих условию

$$\sin\theta_1 = \sqrt{\frac{m_1^2 - n^2}{m_1^2 - 1}}, \tag{1}$$

где $m_1 = \rho_b/\rho_w$ – отношение плотностей дна и воды, $n = \frac{c_w}{\langle c_b \rangle_\lambda}$ – показатель преломления между водным слоем и дном. С другой стороны, угол падения бриллюэновского луча первой моды θ_1 на границу вода/дно

$$\theta_1 = \arcsin\left(\frac{q_1}{k_w}\right), \tag{2}$$

где $q_1 = Re(\xi_1)$ – действительная часть постоянной распространения первой моды, $k_w = \frac{2\pi f}{c_w}$. Условие $\theta = \theta_1$ соответствует максимальному прохождению первой моды в дно.

С учетом выражения (1) и (2) критерий водоподобности (см. (5) в [1]) примет следующий вид:

$$\frac{c_w}{\sqrt{1 + \frac{\hat{q}_1^{\,2} c_w^2}{4\pi^2 f^2}\left(\left(\frac{\rho_b}{\rho_w}\right)^2 - 1\right)}} < \langle c_b \rangle_\lambda < \frac{c_w}{\sqrt{1 - \left(\frac{c_w}{4fH}\right)^2}}, \tag{3}$$

где q_1 может быть взята как $\hat{q}_1 = \frac{q_1^s + q_1^h}{2}$, где q_1^s соответствует абсолютно мягкому дну, q_1^h - абсолютно жесткому.

На рис. 4 представлены зависимости $\langle c_b \rangle_\lambda$ от частоты звука f от 30 до 100 Гц, соответствующие границам типа дна, при $H = 25$ м, $c_w = 1455$ м/с, $m_1 = 1.2$.

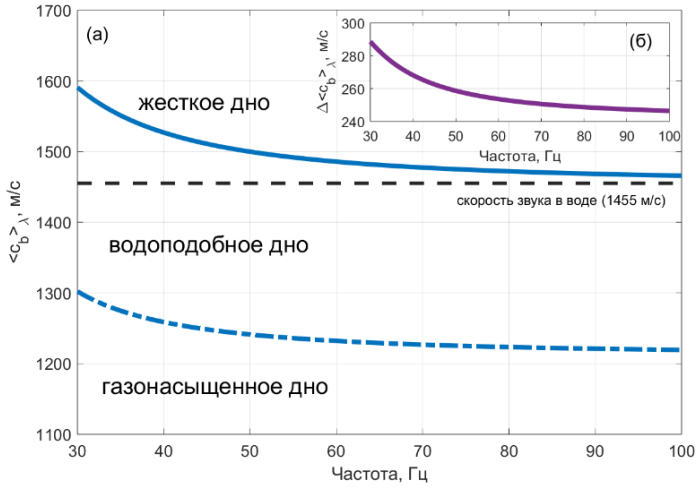


Рис. 4. Соответствие типов дна с усредненной по глубине скоростью звука в донных осадках $\langle c_b \rangle_\lambda$ в зависимости от частоты (а). Изменение диапазона скоростей звука $\Delta\langle c_b \rangle_\lambda$ для водоподобного типа дна (б).

Заключение

Минимальное значение скорости звука в исследуемой в докладе придонной аномалии составляет 1326 м/с. Согласно критерию типов дна (см. рис. 4), данный участок в частотном диапазоне 30 – 100 Гц расценивается как водоподобное дно. Согласно экспериментальным данным, существенные потери при распространении сейсмоакустического сигнала над аномальным участком наблюдаются на частотах до 50 Гц. На высоких частотах более 300 Гц основная энергия сигнала переносится водными модами и влияние аномального дна в этом случае минимальное.

Источник финансирования. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-72-10121-П.

Список литературы

1. *Григорьев В. А., Луньков А. А., Петников В. Г.* Затухание звука в мелко водных акваториях с газонасыщенным дном // Акустический журнал. 2015. **61**, № 1. С. 90–100.

2. *Yuan F., Bennell J. D., Davis A. M.* Acoustic and physical characteristics of gassy sediments in the western Irish Sea //Continental Shelf Research. 1992. **12**, № 10. P. 1121-1134.

3. *Lunkov A. A., Shermeneva M. A.* Application of Warping Transform for the Analysis of the Acoustic Mode Coupling due to a Local Inhomogeneity in Shallow Water // Physics of Wave Phenomena. 2023. **31**, № 6. P. 396–405

4. *Rutenko A. N.* et al. Acoustic monitoring and analyses of air gun, pile driving, vessel, and ambient sounds during the 2015 seismic surveys on the Sakhalin shelf //Environmental Monitoring and Assessment. 2022. **194**, № Suppl 1. P. 744.

5. *Сидоров Д.Д., Боджона С.Д., Петников В.Г., Луньков А.А*. Оценка протяжённости областей водоподобного дна на акустических трассах в мелком море // Доклады Российской академии Наук. Физика, технические науки. 2024. **515**, № 1. С. 85–90.

УДК: 534.231 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39446

Распространение звука в морском волноводе с резким изменением рельефа дна

Ю.И. Папкова

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», 299053, Российская Федерация, г. Севастополь, ул. Университетская 33,

E-mail: yulia.papkova@gmail.com

Аннотация: Представлено аналитическое решение задачи о распространении звука точечным источником в морском волноводе, имеющем резкое изменение сечения, которое моделируется как цилиндрический выступ или впадина. Потенциал скоростей строится в каждой из частей декомпозиции волновода в виде ряда по нормальным модам, с последующей сшивкой решения. Для определения коэффициентов при нормальных модах используется аппарат бесконечных систем линейных алгебраических уравнений.

Ключевые слова: неоднородный волновод, уравнение Гельмгольца, нормальные моды, квазирегулярность, асимптотика.

PACS: 43.20 Bi

Sound propagation in a marine waveguide with a sharp change in bottom relief

Y.I. Papkova

Sevastopol State University,

E-mail: yulia.papkova@gmail.com

Abstract: An analytical solution to the problem of sound propagation by a point source in a marine waveguide with an abrupt cross-sectional change, modeled as a cylindrical protrusion or depression, is presented. The velocity potential is constructed in each part of the waveguide decomposition as a series of normal modes, with subsequent stitching of the solution. The coefficients of the normal modes are determined using the apparatus of infinite systems of linear algebraic equations.

Key words: inhomogeneous waveguide, Helmholtz equation, normal modes, quasiregularity, asymptotic.

Введение

При теоретическом анализе звуковых полей в акустических волноводах широкое применение получил метод декомпозиции области волновода на элементарные области, с

помощью которого, соответствующие задачи сводятся к решению бесконечной системы линейных алгебраических уравнений или к системе интегральных уравнений. Наличие изломов, угловых точек и ребер границ волноводов позволяет эффективно решить бесконечную систему в силу того, что асимптотика неизвестных находится благодаря априорно известному характеру особенности вблизи угла.

Рассматривается применение метода декомпозиции волновода на примере решения задачи о звуковом поле в гидроакустическом волноводе с подводным выступом (впадиной) цилиндрической формы.

1 Материалы и методы

Начало цилиндрической системы координат расположим на поверхности волновода над точечным источником звука с координатами $(0, z_0)$, излучающим волну круговой частоты $\omega=2\pi f$, ось Oz направлена ко дну. Разобьем волновод на две области цилиндрической формы, каждая из которых характеризуется скоростью звука $c_j(z)$ и постоянной глубиной h_j (j = 0, 1). Выступ моделируется, если выполняется условие $h_0 < h_1$, радиус основания цилиндрического выступа при этом r_0, а высота $(h_1 - h_0)$ (рис.1). Если наоборот $h_0 > h_1$, то моделируется впадина глубины $(h_0 - h_1)$. Скорость звука в воде предполагается содержащей лишь основную рефракционную составляющую, обозначим ее как $c(z)$.

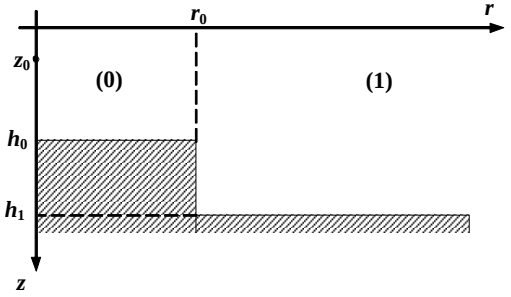


Рис.1 Гидроакустический волновод с выступом.

Известно [1 - 4], что звуковое поле в акустическом волноводе определяется амплитудой потенциала скорости, тогда в каждой из частичных областей (0) и (1) потенциалы Φ_0 и Φ_1 должны удовлетворять уравнениям Гельмгольца

$$\Delta\Phi_0 + \frac{\omega^2}{c^2(z)}\Phi_0 = -\frac{\delta(z-z_0)\delta(r)}{2\pi r}, \quad \Delta\Phi_1 + \frac{\omega^2}{c^2(z)}\Phi_1 = 0,$$

где $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial z^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial r^2}$ - оператор Лапласа, δ - дельта-функция Дирака.

В качестве граничных условий используем условия, что поверхность волновода является абсолютно мягкой, а дно и выступ являются абсолютно жесткими:

$$\Phi(r,0)=0,\ \left.\frac{\partial\Phi}{\partial z}\right|_{z=h_0}=0\quad (r<r_0),\ \left.\frac{\partial\Phi}{\partial z}\right|_{z=h_1}=0\quad (r>r_0),\ \left.\frac{\partial\Phi}{\partial r}\right|_{r=r_0}=0\quad (h_0<z<h_1).$$

Заметим, что в каждой из областей (0) и (1), поставленная краевая задача допускает точное аналитическое решение. Данное решение можно построить методом разделения переменных, как это делается для волновода с плоскопараллельными границами, добавляя при этом однородные решения, за счет которых происходит сшивка решения на $r = r_0$. Обозначим значение амплитуды потенциала скорости Ф в области (0) как Φ_0, а в области (1) как Φ_1. Тогда, используя граничные условия, а также условия затухания при $r\to\infty$, можно построить Φ_0 и Φ_1 виде суммы нормальных мод с неопределенными коэффициентами A_n и B_n в виде:

$$\Phi_0=\frac{i}{4}\sum_{n=0}^{\infty}\frac{\varphi_{0n}(z_0)}{\gamma_{0n}}\varphi_{0n}(z)H_0^{(1)}(\xi_{0n}r)+\sum_{n=0}^{\infty}A_n\varphi_{0n}(z)J_0(\xi_{0n}r) \tag{1}$$

$$\Phi_1=\sum_{n=0}^{\infty}B_n\varphi_{1n}(z)H_0^{(1)}(\xi_{1n}r) \tag{2}$$

где $\gamma_{0n}=\int_0^{h_0}\varphi_{0n}^2(s)ds$, $H_0^{(1)}(\xi r)$, $J_0(\xi r)$ - функции Ханкеля и Бесселя нулевого порядка. Вертикальные собственные функции $\varphi_{jn}(z)\quad (j=0,1)$ и соответствующие им собственные числа $\xi_{jn}\quad (j=0,1)$ - решения следующих краевых задач

$$\frac{d^2\varphi}{dz^2}+\left(\frac{\omega^2}{c^2(z)}-\xi^2\right)=0$$

$$\varphi(0;\xi)=0,\quad \frac{d\varphi}{dz}(h_j;\xi)=0$$

Заметим, что задача Штурма - Лиувилля имеет точные решения дифференциального уравнения лишь для немногих зависимостей профиля скорости звука c(z), в частности для постоянного профиля скорости звука $c(z) = c_0$ решением краевой задачи типа Штурма-Лиувилля является система собственных функций

$$\varphi_{jn}(z)=\sin\frac{\pi(2n+1)}{2h_j}z$$

которые соответствуют собственным числам

$$\xi_{jn}=\sqrt{\left(\frac{\omega}{c_0}\right)^2-\left(\frac{\pi(2n+1)}{2h_j}\right)^2}$$

Краевые условия и условия сопряжения полей для выступа $h_0 < h_1$ имеют следующий вид при $r = r_0$:

$$\Phi_1(r_0, z) = \Phi_0(r_0, z) \quad z \in [0; h_0] \tag{3}$$

$$\frac{\partial \Phi_1}{\partial r} = \begin{cases} \dfrac{\partial \Phi_0}{\partial r}, & z \in [0; h_0) \\ 0, & z \in [h_0; h_1] \end{cases} \tag{4}$$

и для впадины $h_0 > h_1$ при $r = r_0$:

$$\Phi_1(r_0, z) = \Phi_0(r_0, z) \qquad z \in [0; h_1] \tag{5}$$

$$\frac{\partial \Phi_0}{\partial r} = \begin{cases} \dfrac{\partial \Phi_1}{\partial r}, & z \in [0; h_1) \\ 0, & z \in [h_1; h_0] \end{cases} \tag{6}$$

Подставляя выражения звуковых потенциалов (1) - (2) в условия (3) - (6), в силу ортогональности собственных функций $\varphi_{jn}(z) \quad (j = 0,1)$ краевых задач в пространстве интегрируемых с квадратом функций $L_2[0;\ h_j]$, получаем бесконечную систему линейных алгебраических уравнений относительно неопределенных коэффициентов A_n, B_n.

Для выступа $h_0 < h_1$ она имеет следующий вид:

$$A_m \gamma_{0m} J_0(\xi_{0m} r_0) = \sum_{n=0}^{\infty} I_{mn} H_0^{(1)}(\xi_{1n} r_0) B_n - \frac{i}{4} \varphi_{om}(z_0) H_0^{(1)}(\xi_{0m} r_0) \tag{7}$$

$$B_m \gamma_{1m} \xi_{1m} H_1^{(1)}(\xi_{1m} r_0) = \sum_{n=0}^{\infty} I_{nm} J_1(\xi_{0n} r_0) \xi_{0n} A_n + \frac{i}{4} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\varphi_{on}(z_0)}{\gamma_{0n}} \xi_{0n} H_1^{(1)}(\xi_{0n} r_0) I_{nm} \tag{8}$$

($m = 0, 1, \ldots$)

Для впадины $h_0 > h_1$ бесконечная система принимает следующий вид:

$$A_m \gamma_{0m} \xi_{0m} J_1(\xi_{0m} r_0) = \sum_{n=0}^{\infty} I_{mn} \xi_{1n} H_1^{(1)}(\xi_{1n} r_0) B_n - \frac{i}{4} \varphi_{om}(z_0) \xi_{0m} H_1^{(1)}(\xi_{0m} r_0) \tag{9}$$

$$B_m \gamma_{1m} H_0^{(1)}(\xi_{1m} r_0) = \sum_{n=0}^{\infty} I_{nm} J_0(\xi_{0n} r_0) A_n + \frac{i}{4} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\varphi_{on}(z_0)}{\gamma_{0n}} H_0^{(1)}(\xi_{0n} r_0) I_{nm} \tag{10}$$

($m = 0, 1, \ldots$)

где $\gamma_{1n} = \int_0^{h_1} \varphi_{1n}^2(s) ds$, $I_{mn} = \int_0^{\min(h_0, h_1)} \varphi_{0m}(s) \varphi_{1n}(s) ds$.

Заметим, что бесконечные системы (7) - (8) и (9) - (10) можно упростить, если ввести новые последовательности неизвестных следующим образом

$$Z_{2m} = \begin{cases} (-1)^m A_m \xi_{0m} J_1(\xi_{0m} r_0), & h_0 < h_1 \\ (-1)^m B_m \xi_{1m} H_1^{(1)}(\xi_{1m} r_0), & h_0 > h_1 \end{cases} \text{ и } Z_{2m+1} = \begin{cases} B_m \xi_{1m} H_0^{(1)}(\xi_{1m} r_0), & h_0 < h_1 \\ A_m \xi_{0m} J_0(\xi_{0m} r_0), & h_0 > h_1 \end{cases}$$

Тогда получаем, что обе бесконечные системы могут быть записаны как

$$\begin{pmatrix} Z_{2m} \\ Z_{2m+1} \end{pmatrix} = \sum_{n=0}^{\infty} \begin{pmatrix} 0 & M_{2m,2n+1} \\ M_{2m+1,2n} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Z_{2n} \\ Z_{2n+1} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B_{2m} \\ B_{2m+1} \end{pmatrix}, \quad (m = 0,1,....) \tag{11}$$

или в канонической форме

$$Z_m = \sum_{n=0}^{\infty} M_{mn} Z_n + B_m, \quad (m = 0,1,....). \tag{12}$$

Значения коэффициентов и свободных членов бесконечной системы линейных алгебраических уравнений (11) для ступенчатого морского акустического волновода можно выразить формулами

$$M_{2m,2n+1} = \begin{cases} \dfrac{(-1)^m \xi_{0m} J_1(\xi_{0m} r_0)}{\gamma_{0m} J_0(\xi_{0m} r_0) \xi_{1n}} I_{mn}, & h_0 < h_1 \\ \dfrac{(-1)^m \xi_{1m} H_1^{(1)}(\xi_{1m} r_0)}{\gamma_{1m} H_0^{(1)}(\xi_{1m} r_0) \xi_{0n}} I_{nm}, & h_0 > h_1 \end{cases}, \; M_{2m+1,2n} = \begin{cases} \dfrac{(-1)^n H_0^{(1)}(\xi_{1m} r_0)}{\gamma_{1m} H_1^{(1)}(\xi_{1m} r_0)} I_{nm}, & h_0 < h_1 \\ \dfrac{(-1)^n J_0(\xi_{0m} r_0)}{\gamma_{0m} J_1(\xi_{0m} r_0)} I_{mn}, & h_0 > h_1 \end{cases}$$

$$B_{2m} = \begin{cases} \dfrac{i}{4} \dfrac{(-1)^{m+1} \xi_{0m} J_1(\xi_{0m} r_0)}{\gamma_{0m} J_0(\xi_{0m} r_0) \xi_{1n}} \varphi_{om}(z_0) H_0^{(1)}(\xi_{0m} r_0), & h_0 < h_1 \\ \dfrac{i}{4} \dfrac{(-1)^m \xi_{1m} H_1^{(1)}(\xi_{1m} r_0)}{\gamma_{1m} H_0^{(1)}(\xi_{1m} r_0)} \sum\limits_{n=0}^{\infty} \dfrac{\varphi_{on}(z_0)}{\gamma_{0n}} H_0^{(1)}(\xi_{0n} r_0) I_{nm}, & h_0 > h_1 \end{cases}$$

$$B_{2m+1} = \begin{cases} \dfrac{i}{4} \dfrac{H_0^{(1)}(\xi_{1m} r_0)}{\gamma_{1m} H_1^{(1)}(\xi_{1m} r_0)} \sum\limits_{n=0}^{\infty} \dfrac{\varphi_{on}(z_0)}{\gamma_{0n}} \xi_{0n} H_1^{(1)}(\xi_{0n} r_0) I_{nm}, & h_0 < h_1 \\ -\dfrac{i}{4} \dfrac{J_0(\xi_{0m} r_0)}{\gamma_{0m} J_1(\xi_{0m} r_0)} \varphi_{om}(z_0) \xi_{0m} H_1^{(1)}(\xi_{0m} r_0), & h_0 > h_1 \end{cases}$$

2. Асимптотическое поведение неизвестных в бесконечной системе.

Для построения эффективного численного алгоритма нахождения неизвестных в бесконечной системе, используем условие Мейкснера [5], которое описывает a priori поведение модуля колебательной скорости в окрестности точек ребра цилиндрического выступа. Согласно данному условию, на кромке входящего угла α в волноводе, при $R \to 0 \quad (R = \sqrt{(r - r_o)^2 + (z - h_o)^2})$ модуль колебательной скорости имеет особенность вида $|grad\,\Phi| = CR^{\frac{\pi}{\alpha}-1}$, где C - некоторая комплексная константа.

Для ступенчатого волновода $\alpha = 3\pi/2$, следовательно, модуль колебательной скорости имеет степенную особенность вблизи ребра (r_0, h_0) порядка $\pi/\alpha - 1 = -1/3$. Заметим, что в силу условия $\varphi_j'(h_j) = 0$, в окрестности ребра (r_0, h_0) значение вертикальной компоненты колебательной скорости

$$\frac{\partial \Phi_j}{\partial z}(r, h_j) \to 0 \text{ при } r \to r_0$$

Тогда, используя граничные условия и условий непрерывности звукового поля, поведение горизонтальной компоненты колебательной скорости на границе раздела областей $r= r_0$ описывается следующими выражениями для выступа $h_0 < h_1$:

$$\frac{\partial\Phi_0}{\partial r} = S(h_0^2 - z^2)^{-1/3}, \quad z \to h_0 - 0$$

$$\frac{\partial\Phi_1}{\partial r} = \begin{cases} \dfrac{\partial\Phi_0}{\partial r}, & z \to h_0 - 0 \\ 0, & z \to h_0 + 0 \end{cases}$$

и для впадины $h_0 > h_1$:

$$\frac{\partial\Phi_1}{\partial r} = S(h_1^2 - z^2)^{-1/3}, \quad z \to h_1 - 0$$

$$\frac{\partial\Phi_0}{\partial r} = \begin{cases} \dfrac{\partial\Phi_1}{\partial r}, & z \to h_1 - 0 \\ 0, & z \to h_1 + 0 \end{cases}$$

Очевидно, что следующие разности уже не имеют особенностей вблизи $z = h_j$:

$$p_j(z) = \frac{\partial\Phi_j}{\partial r} - S(h_j^2 - z^2)^{-1/3} \text{ и } q_j(z) = \frac{\partial\Phi_{1-j}}{\partial r} - \begin{cases} S(h_j^2 - z^2)^{-1/3}, & z < h_j \\ 0, & z > h_j \end{cases}$$

здесь j =0 соответствует случаю выступа, j =1 – впадине.

Используя, приведенные выше формулы поведение неизвестных B_n при $n \to \infty$ для выступа можно следующим образом

$$B_n H_1^{(1)}(\xi_{1n} r_0) = -\frac{iS\Gamma(2/3)(2h_1)^{2/3}}{\pi^{5/3} h_0^{1/3}} \frac{\sin(\pi\mu(n+1/2) - \pi/3)}{(n+1/2)^{5/3}}$$

Рассматривая аналогичным образом коэффициенты Фурье функции $q_1(z)$, можно оценить асимптотическое поведение коэффициентов B_n для впадины $h_0 > h_1$:

$$B_n H_1^{(1)}(\xi_{1n} r_0) = -\frac{iS\Gamma(2/3)}{\pi^{5/3}} \left(\frac{h_1}{2}\right)^{1/3} \frac{(-1)^n}{(n+1/2)^{5/3}}$$

Далее, рассматривая коэффициенты ряда Фурье функции $p_j(z)$ по системе собственных функций $\varphi_{jn}(z)$, на основании леммы Римана - Лебега имеем

$$\lim_{n\to\infty} \int_0^{h_1} p_j(z)\varphi_{jn}(z)dz = 0$$

откуда, получаем оценки для коэффициентов A_n. В частности, для выступа $h_0 < h_1$

$$A_n J_1(\xi_{0n} r_0) = -\frac{iS\Gamma(2/3)}{\pi^{5/3}} \left(\frac{h_0}{2}\right)^{1/3} \frac{(-1)^n}{(n+1/2)^{5/3}}$$

и для впадины $h_0 > h_1$

$$A_n J_1(\xi_{0n} r_0) = -\frac{iS\Gamma(2/3)(2h_0)^{2/3}}{\pi^{5/3} h_1^{1/3}} \frac{\sin(\pi\mu(n+1/2)-\pi/3)}{(n+1/2)^{5/3}}$$

Из полученных формул следует, что для неизвестных в бесконечной системе (12) будет верна следующая асимптотическая оценка:

$$Z_{2m} = \frac{a_0}{(m+1/2)^{2/3}}, \quad Z_{2m+1} = \frac{2i\mu^{1/3} a_0 \sin(\pi\mu(m+1/2)-\pi/3)}{(m+1/2)^{2/3}} .$$

где a_0 – некоторая комплексная константа.

Заметим, также, что асимптотика будет верна как в случае выступа ($h_0 < h_1$), так и в случае впадины ($h_0 > h_1$). Таким образом, в окрестности сечения волновода $r = r_0$- члены рядов для потенциалов скоростей (1) – (2) с ростом номера n убывают как $n^{-5/3}$, в других точках волновода убывают по экспоненте.

Решение бесконечных систем находилось с помощью метода редукции, в основе которого коэффициенты с индексами выше выбранного значения N можно пренебречь. Сходимость метода редукции строго доказана для регулярных и квазирегулярных бесконечных систем.

3 Численные результаты

Как известно, изменение амплитуды поля в волноводе характеризуется величиной потерь при распространении (интенсивность):

$$TL = -20\lg\left|\frac{\Phi}{\tilde{\Phi}}\right|,$$

где $\tilde{\Phi} = \frac{Qe^{ikr}}{4\pi r}$ - амплитуда потенциала скоростей, создаваемая точечным источником звука на расстоянии r = 1 м в безграничной среде; Q – объемная колебательная скорость. В табл. 1 приведены значения величины потерь $TL(z_0)$ через зону стыка областей (0) и (1) при разных значениях отношения h_0/h_1 для выступа.

Таблица 1

Сравнение величины потерь $TL(z_0)$ при $r = r_0$ и отношении h_0/h_1 для волновода с параметрами h_1 = 100 м, r_0=2h_1, c= 1460 м/с, z_0 =0.1h_1, ω = 100 рад/с.

$\mu = \frac{h_0}{h_1}$	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
$\lvert TL\rvert$	91.59	39.92	41.77	50.92	53.87	44.92	45.34	46.99

Приведенные в табл.1 результаты представляют сведения о влиянии неровностей дна с радиальной симметрией на процесс распространения волн в волноводе. Они позволяют для

каждого конкретного случая рассчитать, является ли влияние формы неровностей дна существенным или в какой мере этим влиянием можно пренебречь.

Заключение

Получено на основе декомпозиции области волновода на части численно-аналитическое решение задачи о звуковом поле в волноводе с жестким дном, имеющем резкое изменение сечения, которое моделируется как цилиндрический выступ или впадина. Предполагается, что поставленная задача имеет радиальную симметрию и допускает возможность декомпозиции на некоторые элементарные подобласти, в которых возможно построение общего решения уравнения Гельмгольца. Потенциал скоростей строится в каждой из частей декомпозиции волновода в виде ряда по нормальным модам, с последующей сшивкой решения на границе. Для определения коэффициентов при нормальных модах используется аппарат бесконечных систем линейных алгебраических уравнений.

Список литературы

1. *Бреховских Л.М*. Волны в слоистых средах. Наука. М., 1973.
2. *Кацнельсон Б.Г., Петников В.Г.* Акустика мелкого моря. Наука. М., 1997.
3. *Толстой И., Клей К.С.* Акустика океана. - М.: Мир, 1969.
4. *Jensen F. B., Porter M. B., Kuperman W. A., Schmidt H.* Computational Ocean Acoustic. - N.Y.: Springer-Verlag, 2011.
5. *Шендеров Е.Л.* Волновые задачи гидроакустики. – Л.: Судостроение, 1972.

УДК: 534.2 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39447

Влияние гидрологических условий на групповые скорости импульсных сигналов в сценарии «шельф-глубокий океан» в волноводах Японского моря

П.Д. Ткаченко[a], М.А. Сорокин[b]

Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичёва Дальневосточного отделения РАН, г. Владивосток.

E-mail: [a]tkachenko.pd@poi.dvo.ru, [b]sorokin.ma@poi.dvo.ru

Точное решение задач акустической дальнометрии имеет первостепенное значение для многих отраслей гидроакустики. На точность решения данного класса задач оказывают влияние как рельеф морского дна на исследуемом участке, так и гидрологические условия во время проведения измерений.

В ходе исследования при помощи метода нормальных волн было проведено моделирование времен прихода модальных компонент акустического сигнала в волноводе Японского моря. Поле скорости звука в волноводе имело ярко выраженный термоклин, глубина акустической трассы плавно убывала по мере удаления от источника, реализуя сценарий «шельф-глубокий океан». Было обнаружено явление так называемых «выныривающих» мод, при котором групповая скорость некоторых модальных компонент на мелководном участке акустической трассы резко возрастает с увеличением номера моды, что противоречит типичной для такого сценария закономерности, при которой групповые скорости мод плавно убывают.

В результате исследования была обнаружена зависимость между количеством «выныривающих» мод, возникающих в волноводе с ярко выраженным термоклином, и глубиной придонного звукового канала. Полученная зависимость дает возможность оценить номер первой «выныривающей» моды, что позволит более качественно расшифровывать импульсные характеристики волновода, и, следовательно, повысит точность решения задачи акустической дальнометрии.

Ключевые слова: акустическая навигация, групповые скорости, метод нормальных волн.

Hydrological sea conditions influence on pulse signals group velocities in the case of shallow-to-deep propagation in waveguides of the Sea of Japan

P.D. Tkachenko[a], M.A. Sorokin[b]

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok, 690041 Russia.

E-mail: [a]tkachenko.pd@poi.dvo.ru, [b]sorokin.ma@poi.dvo.ru

An accurate solution of acoustic ranging problems is essential for many fields of hydroacoustics. Both seabed topography and hydrological conditions of the studied area influence the solution accuracy.

During the study, modeling the arrival times of modal components of the acoustic signal in the waveguide of the Sea of Japan was conducted, using the normal mode method. The sound speed field in the waveguide exhibited a pronounced thermocline, acoustic track

depth decreased gradually with distance from source, corresponding to a shallow-to-deep propagation scenario. A phenomenon of the so-called “sprouting” modes was discovered, characterized by the group velocities of certain modes increasing rapidly with mode number in shallow-water part of acoustic track, which contradicts the typical behavior for this scenario, in which modal group velocities decrease smoothly.
As a result of the study, dependence between the depth of the sound fixing and ranging axis and the number of “sprouting” modes appearing in the waveguide with distinct thermocline was obtained. This relationship makes it possible to estimate the index of the first “sprouting” mode, enabling more accurate reconstruction of the impulse response functions and, consequently, improving the accuracy of acoustic ranging.
Keywords: acoustic ranging, group velocities, normal mode method.

Введение

Современные исследования Мирового океана невозможно представить без автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА), действующих на значительном расстоянии от центров управления и связи [1]. Осуществлять их навигацию возможно только с помощью гидроакустических систем большой дальности, состоящих из источников навигационных сигналов и приемника, входящего в аппаратный комплекс АНПА. Точное решение задач акустической дальнометрии обладает первостепенной важностью для осуществления навигации АНПА. В силу того, что источники навигационных сигналов располагаются, как правило, вблизи береговой линии, а АНПА могут функционировать в сотнях километров от них, особый интерес представляют различные эффекты и закономерности, возникающие при прохождении сигнала из шельфовой части океана в глубоководную [2]. В данном исследовании описан эффект «выныривающих» мод, приводящий к изменению порядка прихода модальных компонент из источника в приемник.

Описание эксперимента

Экспериментальные исследования по излучению и приему звука проводились в акватории Японского моря в летний период с 18.08.2024 по 20.08.2024. Источник навигационных сигналов был установлен на глубине 1 метра от дна (в точке излучения глубина моря составляла 26 метров). Раз в 3 минуты излучались сложные фазоманипулированные сигналы (М-последовательности) с центральной частотой 400 Гц, длиной 1023 символа и заполнением 4 периода несущей частоты на символ. Приемная система представляла собой вертикально распределенную антенну, свешенную с борта научно-исследовательского судна на расстоянии 36 км от ИНС. В ходе эксперимента были получены вертикальные распределения скорости звука в точках излучения и приема, а также в трех точках трассы на расстоянии около 5 морских миль друг от друга. Полученные профили скорости звука также изображены на рис. 1.

В ходе эксперимента были записаны импульсные характеристики волновода (ИХВ), представляющие собой результаты расчета взаимнокорреляционной функции реплик

излученного сигнала с принятыми.

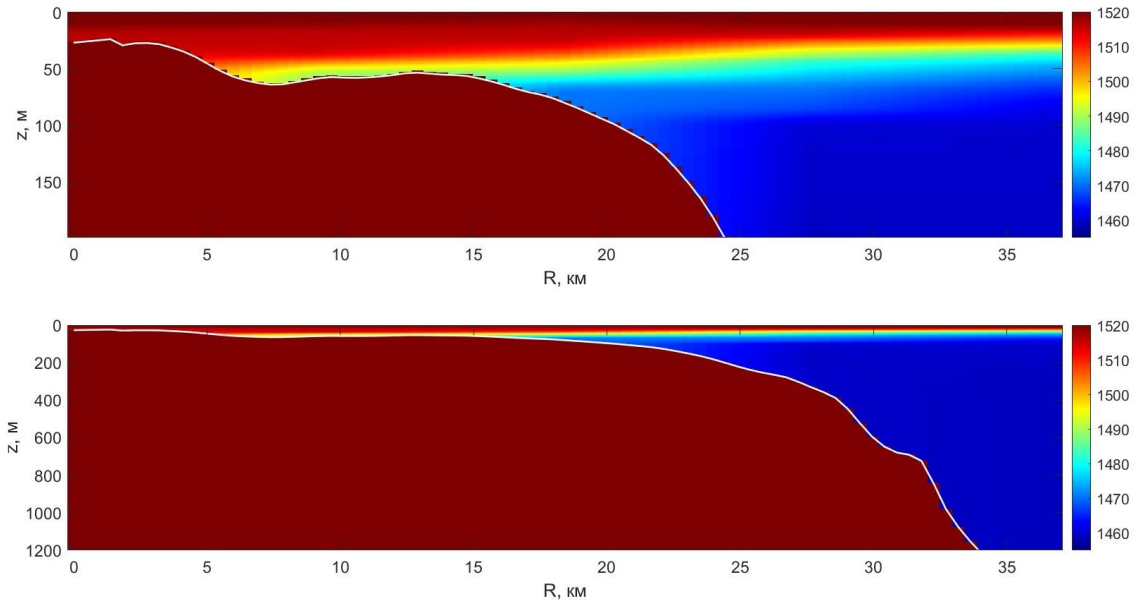


Рис. 1. Рельеф дна вдоль акустической трассы, а также распределение скоростей звука в водном слое на ней.

Конфигурация данной трассы такова, что в ней отсутствует резко выделенная зона свала глубин, характерная для сценариев распространения «шельф-глубокий океан». Подобные сценарии сами по себе интересны в контексте задач акустической дальнометрии при организации гидроакустических навигационных систем большой дальности, для которых характерна установка ИНС в шельфовой зоне [3]. В частности, интерес представляет собой оценки групповых скоростей модовых компонент акустического сигнала, и, как следствие – теоретические оценки времен прихода модовых компонент в точку приема.

Расчет времен прихода излучаемых сигналов

Необходимые расчеты собственных чисел и собственных функций нормальных мод были произведены при помощи разработанной ранее в ТОИ ДВО РАН программы ac_modes [4]. Зная их, можно оценить групповую скорость модальной компоненты, а, следовательно, и произвести оценку времени прихода для каждой модальной компоненты акустического поля.

Анализ нетипичной картины времен прихода модальных компонент

Рис. 2, помимо иллюстрации точности проведенной оценки времени прихода модальных компонент, обращает внимание на порядок прихода мод: первая и вторая модальные компоненты достигают приемника позже, чем третья, четвертая и пятая. Это противоречит типичной картине, при которой первая и вторая моды приходят раньше, чем последующие [5].

Типичной закономерностью, связанной с модовыми функциями, рассчитанными в глубоком океане, является наличие интервала локализации, в границах которого модовая функция

является осциллирующей, а за его пределами экспоненциально затухает (речь в данном случае идет о т.н. “водной моде”).

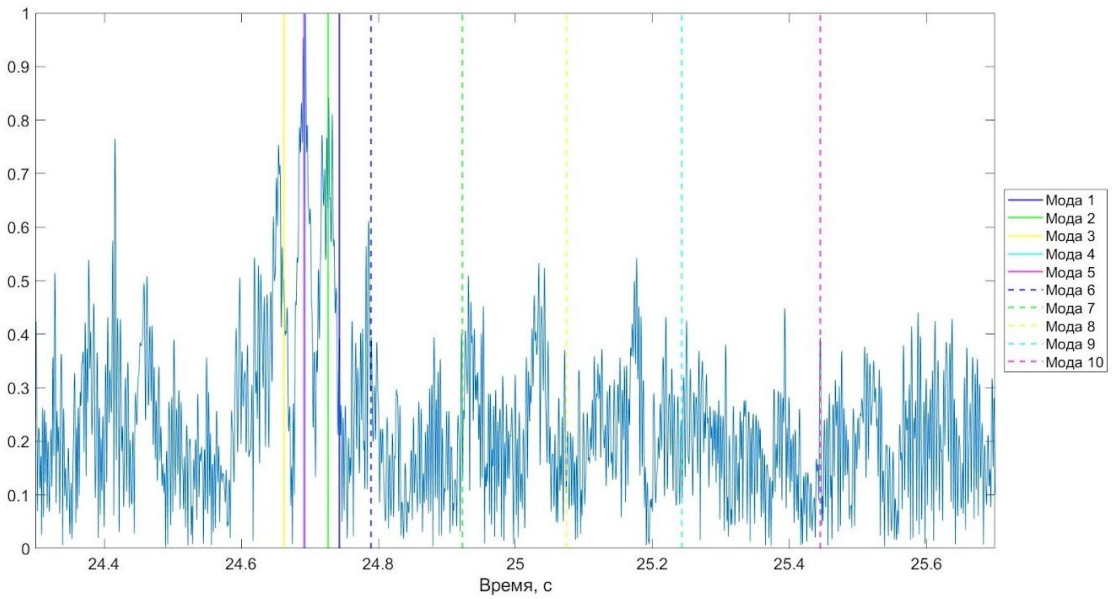


Рис. 2. Наложение времен прихода модальных компонент на пики ИХВ.

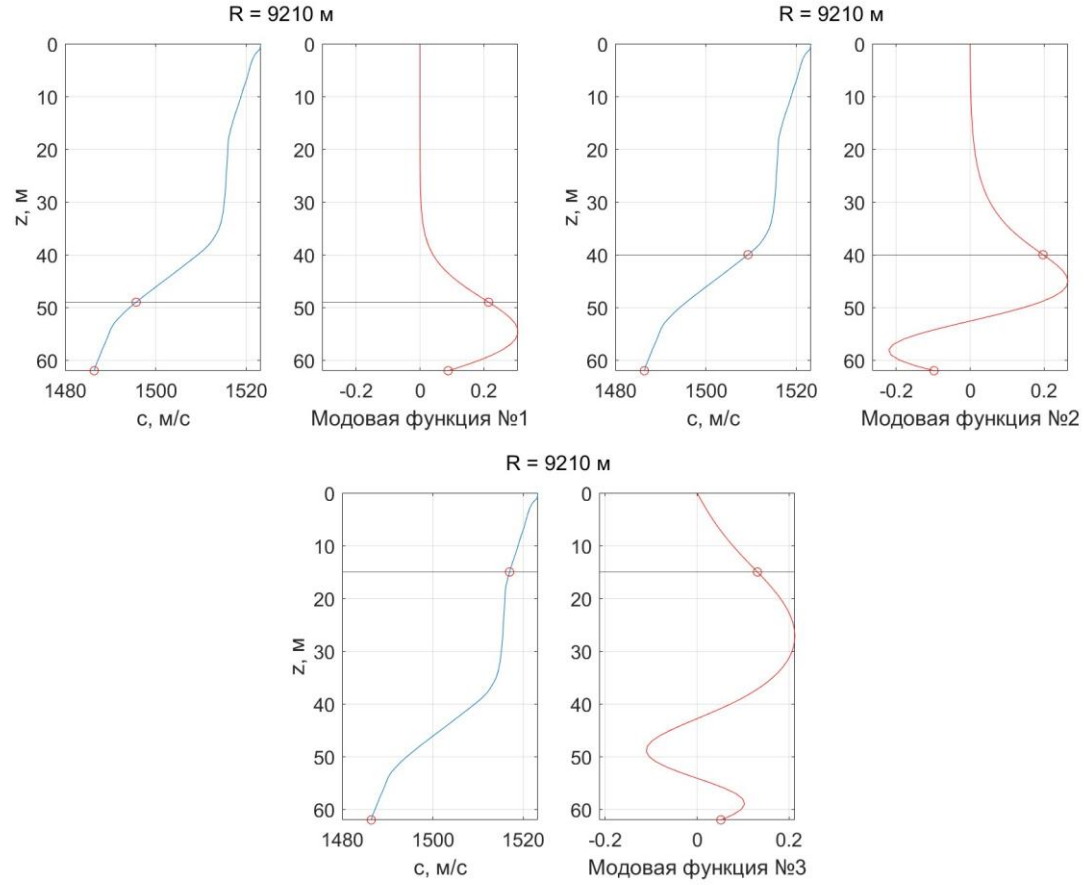


Рис. 3. Сопоставление модовых функций с первой по третью с профилем скорости звука на расстоянии 9210 м от источника. Горизонтальными линиями обозначены границы интервалов локализации мод.

Сопоставим интервалы локализации первых трех мод с профилем скорости звука на расстоянии 9 км от источника (рис. 3). Заметен ярко выраженный термоклин, формирующий

придонный звуковой канал (ПрЗК). Верхняя граница интервалов локализации первой и второй мод лежит в пределах ПрЗК, а для третьей и последующих мод, в то же время, верхние границы интервалов локализации пролегают значительно выше. Аналогичное наблюдается и для максимума их функций относительно ПрЗК. Назовем такие моды, как третья, «выныривающими» из-под термоклина.

Гидрологические условия во время проведения эксперимента вкупе с небольшой глубиной на данном участке акустической трассы обусловили появление «выныривающих» мод, максимумы функций которых лежат вне пределов придонного звукового канала. В сравнении с типичным случаем, повышенная групповая скорость таких мод и приводит к их более раннему, относительно мод меньших номеров, приходу.

Критерий обнаружения выныривающих мод

Для поиска зависимости номера «выныривающей» моды от глубины ПрЗК было выбрано два профиля, расположенные на расстоянии 9210 м и 18420 м от источника. Суть вычислительного эксперимента заключалась в последовательном увеличении толщины ПрЗК, расчете модовых функций и определения номера первой “выныривающей” моды.

Совмещенные графики групповых скоростей мод для всех рассмотренных профилей приведены на рис. 4. Принимая во внимание то, что, как принято считать, с ростом номера моды групповые скорости убывают [5,6], мода с самой высокой групповой скоростью на данном профиле и является «выныривающей».

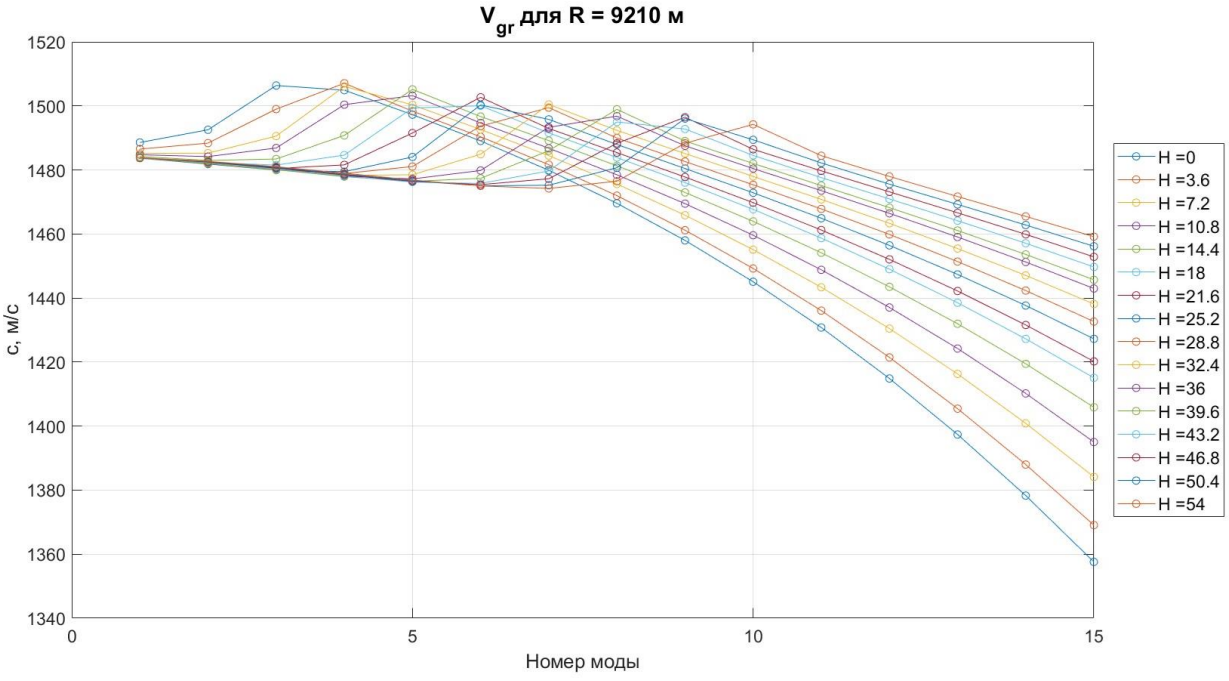


Рис. 4. Групповые скорости мод 1-15 для модельных профилей. Величина H показывает, на сколько метров была увеличена глубина основного экспериментального профиля при создании модельного.

Зависимость номера «выныривающей» моды от глубины ПЗК является линейной, однако ее точные параметры отличаются для каждого экспериментального профиля. Поиск общей закономерности для всех профилей скорости звука остается темой для будущих исследований.

Заключение

В данной работе описаны результаты моделирования распространения звука по сценарию «шельф-глубокий океан» для акустической трассы, отличающейся отсутствием резкого свала глубин, в условиях явно выраженного сезонного термоклина. Оценка времен прихода модальных компонент акустического сигнала выявила расхождение с типичным для данного сценария порядком прихода мод. При дальнейшем рассмотрении было обнаружено явление «выныривающих» мод, чьи максимумы функций лежат выше ПрЗК, образованного термоклином, и найден критерий оценки номера выныривающей моды для данного профиля скорости звука.

Список литературы

1. *Peter N. Mikhalevsky, Brian J. Sperry, Katherine F. Woolfe, Matthew A. Dzieciuch, Peter F. Worcester*; Deep ocean long range underwater navigation // J. Acoust. Soc. Am. – 2020. Vol**. 147** (4). – P. 2365–2382
2. *W.H. Munk*; Sound channel in an exponentially stratified ocean with applications to SOFAR // J. Acoust. Soc. Am. – 1974. – V. **55**. – P. 220–226.
3. Средства и методы гидролого-акустического обеспечения высокоточного позиционирования подводных объектов на больших дальностях / Моргунов Ю.Н., Голов А.А., Каменев С.И., Матвиенко Ю.В. // Акустический журнал. – 2019. – Т. 65. № 6. – С. 793–798.
4. Программный комплекс ac_modes. URL: https://github.com/kaustikos/ac_modes/ (дата обращения: 27.03.2026 г.)
5. Jensen F.B., Kuperman W.A., Porter M.B., Schmidt H. Computational Ocean Acoustics. New-York: Springer, 2012. 794 p.
6. Исследование времен прихода импульсных сигналов при распространении из мелкого моря в глубокий океан в волноводах японского моря / М. А. Сорокин, А. А. Голов, С. С. Шкрамада, А. Ч. Гузовская, П. Д. Ткаченко, Д. В. Сокиркина, Ю. Н. Моргунов, П. С. Петров // Акустический журнал. – 2025. – Т. 71, № 6. – С. 824-834.

УДК: 534.26 DOI: 10.34756/GEOS.2026.17.39448

Изгибные колебания балки в жидкости

О.И. Косарев[1], А.К. Пузакина[1]

[1] Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, 101000, Россия

E-mail: kosarevoi@yandex.ru

Аннотация: Предложена методика расчета АЧХ вынужденных колебаний и форм колебаний балок в жидкости. Установлено, что резонансные частоты колебаний балок в жидкости сдвигаются в сторону меньших значений, амплитуды колебаний уменьшаются, формы собственных колебаний балок в вакууме ив жидкости сохраняются, но в жидкости они реализуются на более низких частотах.

Ключевые слова: балка, жидкость, вынужденные колебания, амлитудно-частотные характеристики, резонансы, формы собственных колебаний, импеданс

Bending Vibrations of a Beam in a Liquid

O.I. Kosarev[1], A.K. Puzakina[1]

[1] A.A. Blagonravov Institute of Mechanical Engineering, Russian Academy of Sciences, Moscow. 101000, Russia

E-mail: kosarevoi@yandex.ru

Abstract: A method for calculating the frequency response of forced vibrations and vibration modes of beams in liquids is proposed. It is established that the resonant frequencies of beam vibrations in liquids shift toward lower values, the vibration amplitudes decrease, and the natural vibration modes of beams in vacuum and liquids are preserved, but in liquids they occur at lower frequencies.

Keywords: beam, liquid, forced vibrations, amplitude-frequency characteristics, resonances, natural vibration modes, impedance

Введение

Рассматриваемые балки применяются в качестве динамических моделей подводных конструкций, погруженных в жидкость. Балка, колеблющаяся в жидкости, является источником гидроакустического излучения. В литературе рассмотрены собственные колебания стержней и балок в воздухе [1-6]. Методику расчета вынужденных колебаний балок, погруженных в жидкость, найти не удалось [7-10]. Проблема колебаний балок в

жидкости в последнее время вызывает интерес в связи с расширяющимся использованием подводных конструкций. Этим определяется актуальность задачи.

Цель. Разработка методики расчета изгибные колебания балок, погруженных в жидкость.

Новизна. Методика впервые позволяет определить вибрационные характеристики, в том числе: АЧХ, резонансные частоты и формы колебаний балок в жидкости.

Полезность. Методика может применяться для расчета и прогнозирования вибрационных характеристик при проектировании подводных конструкций. Балка является удобной упрощенной тестовой моделью для изгибных колебаний цилиндрических оболочек при окружной гармонике n=1.

Коэффициенты C_1-C_4 в формуле полного решения уравнения колебаний балки определяются граничными условиями при заданной внешней нагрузке.

Поскольку влияние жидкости проявляется одинаково для балок с любыми граничными условиями, начнем с описания свойств жидкости. Присутствие жидкости проявляется тем, что при колебаниях балки возникает излучаемое балкой звуковое поле, оказывающее звуковое давление на балку. Давление звукового поля, излучаемого цилиндрической балкой, определяется частным решением волнового уравнения Гельмгольца

$$p_s = B\, H_n^{(2)}(r\sqrt{k^2-\gamma^2})\; e^{ikx}$$

где $H_n^{(2)}(r\sqrt{k^2-\gamma^2}$ функция Ганкеля второго рода. Далее в функции Ганкеля верхний индекс (2) опускаем и порядковый номер n принимаем n=1 для балочных форм колебаний.

Коэффициент B определяется из граничного условия

$$\left.\frac{\partial p_s}{\partial r}\right|_{r=a} = \rho_0 \cdot \omega^2 w$$

где w- прогиб балки, ρ_0- плотность жидкости, $\omega=2\pi f$ - угловая частота колебаний, f- частота колебаний в Гц.

После определения коэффициента B звуковое давление на поверхности балки

$$p_s = \frac{\rho_0 \omega^2\; H_1(a\sqrt{k^2-\gamma^2})\, w}{\sqrt{k^2-\gamma^2}\; H_1'(a\sqrt{k^2-\gamma^2})} = Z \cdot w$$

где $\gamma=k\cos\Theta$. $k=\omega/c$ - волновое число, Θ- угол наблюдения. Звуковое давление выражено через импеданс Z излучения

$$Z = \frac{a\rho_0\omega^2 H_1(\mu)}{\mu H_1'(\mu)}, \qquad (1)$$

где $\mu=ak\cos\Theta$. В уравнении колебаний балки в жидкости к балке дополнительно к инерционной погонной нагрузке $q_m=m\omega^2 w/L$ прикладывается погонная нагрузка от звукового давления, которую можно представить в виде $q_s = ZLw$. Поскольку данная нагрузка так же, как и инерционная погонная нагрузка, определяется действительными числами, то импеданс в выражении q_s берем по модулю $|Z|$, т.к. функция Ганкеля и ее производная являются комплексными числами..

Рассматривается балка постоянного поперечного сечения со свободными краями. На одном из них, не важно на каком, приложена сосредоточенная нагрузка. Начало координат принято в начале балки $x=0$, нагрузка приложена на противоположном конце балки $x=L$

Уравнение колебаний свободной балки имеет вид

$$EJ\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \rho_m F\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - ZLw = 0 \qquad (2)$$

Внешняя сосредоточенная нагрузка P учитывается в граничных условиях. Граничные условия имеют вид

$$1)\ \left.\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right|_{x=0} = 0, \quad 2)\ \left.\frac{\partial^3 w}{\partial x^3}\right|_{x=0} = 0, \quad 3)\ \left.\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right|_{x=L} = 0, \quad 4)\ \left.\frac{\partial^3 w}{\partial x^3}\right|_{x=L} = -P$$

Колебания балки считаем гармоническими $w=W\cos\omega t$. Подставив их в (2) уравнение колебаний получим

$$W^{IV} - \beta^4 W = 0 \qquad (3)$$

Решение уравнения (3) представим в виде

$$W = C_1 \sin\beta x + C_2 \cos\beta x + C_3 sh\beta x + C_4 ch\beta x\,. \qquad (4)$$

Коэффициенты C_1-C_4 в (4) найдем из решения системы уравнений (5), определяемой граничными условиями, где штрихи над W обозначают производные по x.

$$
\begin{aligned}
W''(0) &= -C_1 \sin\beta x - C_2 \cos\beta x + C_3 sh\beta x + C_4 ch\beta x = 0 \\
W'''(0) &= -C_1 \cos\beta x + C_2 \sin\beta x + C_3 ch\beta x + C_4 sh\beta x = 0 \\
W''(L) &= -C_1 \sin\beta x - C_2 \cos\beta x + C_3 sh\beta x + C_4 ch\beta x = 0 \\
W'''(L) &= -C_1 \cos\beta x + C_2 \sin s\beta x + C_3 ch\beta x + C_4 sh\beta = -\frac{P}{EJ\beta^3}
\end{aligned}
\tag{5}
$$

Из первых двух уравнений (5) находим

$$C_2 = C_4, \quad C_1 = C_3. \tag{6}$$

Остальные коэффициенты найдем из решения матричного уравнения

$$
\begin{vmatrix} ch\beta L - \cos\beta L & sh\beta L - \sin\beta L \\ sh\beta L + \sin\beta L & ch\beta L - \cos\beta L \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} C_4 \\ C_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 \\ -\dfrac{P}{EJ\beta^3} \end{vmatrix}
$$

$$
C_3 = -\frac{P}{2 \cdot EJ\beta^3} \cdot \frac{(ch\beta L - \cos\beta L)}{(1 - ch\beta L \cdot \cos\beta L)}, \qquad C_4 = -\frac{P}{2 \cdot EJ\beta^3} \cdot \frac{(sh\beta L - \sin\beta L)}{(1 - ch\beta L \cdot \cos\beta L)} \tag{7}
$$

После подстановки найденных коэффициентов (6) и (7) в выражение (4) определим прогиб

$$
W = \frac{P \cdot [(sh\beta L - \sin\beta L) \cdot (ch\beta x + \cos\beta x) - (ch\beta L - \cos\beta L) \cdot (sh\beta x + \sin\beta x)]}{2 \cdot EJ\beta^3 \cdot (1 - ch\beta L \cdot \cos\beta L)} \tag{8}
$$

Формула (8) позволяет получить амплитудно - частотные характеристики, по ним определять резонансные частоты и формы колебаний.

На рис. 1, а, б. показаны АЧХ колебаний в ускорениях *Y* свободной балки а) в вакууме и б) в воде. Первая резонансная частота свободной балки в вакууме *f*= 7.2 Гц. а первая частота на шарннрно опертой балки *f*= 3.2 , они соответствуют известным формулам [2, 3].

На рис. 2, а, б показаны формы колебаний свободной балки w(Re, Im) на резонансах: а) в вакууме *f*= 7.2 Гц, б) в жидкости *f*= 2.5 Гц

Отметим, что у свободной балки в вакууме первая резонансная частота *f*= 7,2 Гц , а в жидкости первая резонансная частота *f*= 2.5 Гц, Резонансная частота изменяется, а форма собственных колебаний остается неизменной

Общая принципиальная картина влияния жидкости на колебания балок такова. Влияние одинаково для балок с различными граничными условиями. Для балок в жидкости

резонансные частоты смещаются в область более низких частот, уровни колебаний на резонансах в ускорениях падают, амплитуды перемещений остаются одинаковыми и формы собственных колебаний также остаются одинаковыми. Конкретные количественные оценки влияния жидкости на колебания балок в жидкости могут быть получены в каждом конкретном случае граничных условий и типе внешней нагрузки.

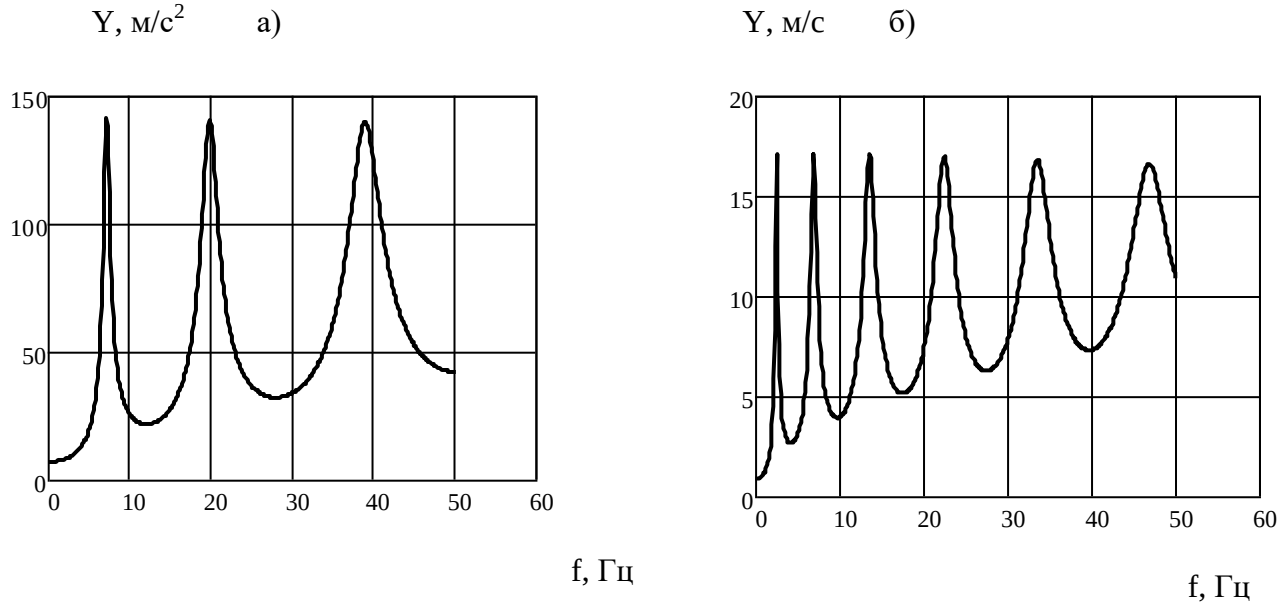


Рис. 1, а, б. АЧХ колебаний свободной балки: а) в вакууме, б) в жидкости

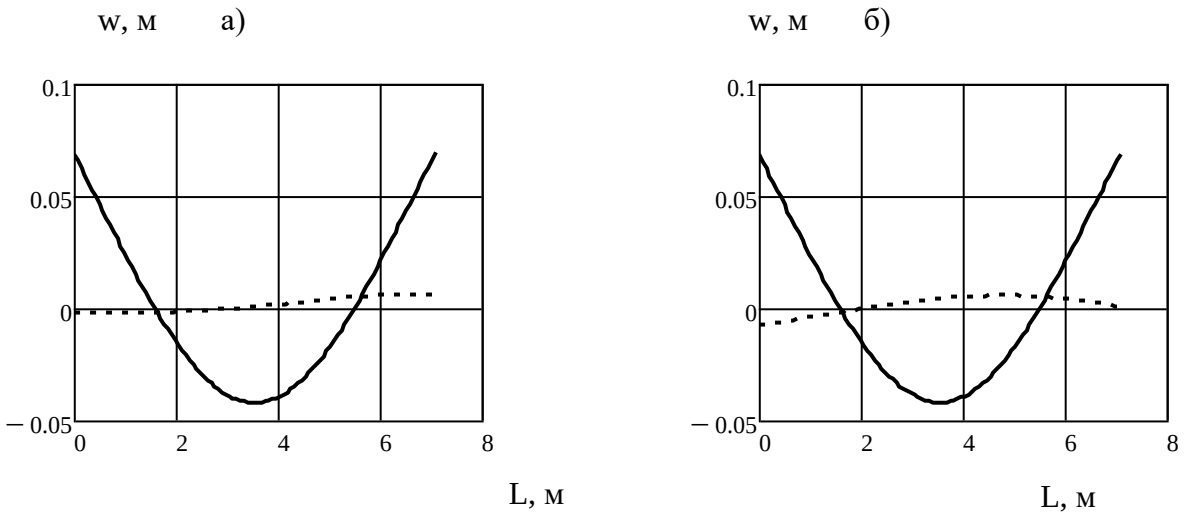


Рис. 2, а, б. Формы колебаний свободной балки на резонансах: а) в вакууме f= 7.2 Гц, б) в жидкости f= 2.5 Гц

Общая принципиальная картина влияния жидкости на колебания балок такова. Влияние одинаково для балок с различными граничными условиями. Для балок в жидкости резонансные частоты смещаются в область более низких частот, уровни колебаний на

резонансах в ускорениях падают, амплитуды перемещений остаются одинаковыми и формы собственных колебаний также остаются одинаковыми. Конкретные количественные оценки влияния жидкости на колебания балок в жидкости могут быть получены в каждом конкретном случае граничных условий и типе внешней нагрузки.

Наиболее сильное влияние жидкости происходит на низких частотах, поскольку с увеличением частоты колебаний амплитуды колебаний уменьшаются. Если балку считать абсолютно твердым телом, то никакого излучения звука у нее не будет.

Заключение

Предложена методика расчета АЧХ вынужденных колебаний и форм колебаний балок в жидкости. Установлено, что резонансные частоты колебаний балок в жидкости сдвигаются в сторону меньших значений, амплитуды резонансных колебаний уменьшаются. Формы собственных колебаний балок в вакууме и в жидкости сохраняются, хотя в вакууме и в жидкости они реализуются на разных частотах. Предложенный метод оценки влияния жидкости на АЧХ колебаний применим для любых балок с любыми граничными условиями.
Работа выполнена по Госзаданию Минобрнауки FFGU- 0017.

Список литературы

1. *Дж. П. Ден - Гартог.* Теория колебаний. ОГИЗ, М.-Л., 1942.
2. *Е. Скучик.* Простые и сложные колебательные системы. Мир. М., 1971.
3. *Тимошенко С.П.* Колебания в инженерном деле. Наука. М., 1967.
4. *Пановко Я.Г.* Основы прикладной теории упругих колебаний. Машиностроение. М.,1967.
5. Вибрации в технике. Том 1/Под ред. чл.- корр. АН СССР В.В. Болотина. Машиностроение. М., 1978.
6. *Шендеров Е.Л.* Волновые задачи гидроакустики. Л.: Судостроение, 1972. 348 с.
7. *Гусев А.Ф., Новоселова Н.В.* Основы прикладной теории механических колебаний. Изд-во Инфра – Инженерия. М., 2025.
8. *Вулфсон И.И.* Динамика машин. Колебания. Изд-во Юрайт. М., 2024.
9. *Хазов П.А., Кожанов Д.А., Анущенко А.М., Сатанов А.А.* Динамика строительных конструкций при экстримальных природных воздействиях: Колебания, Прочность. Ресурс. Изд-во НГАСУ, Н.- Новгород. 2022..
10. *Денцов Н.Н., Кошелев А.А., Шестоперов В.Ю. Воробьева И.В.* Теория колебаний, линейные системы. Изд-во НГТУ. Н.-Новгород, 2022.

УДК: 534.23 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39449

Применение преобразования автопроизведение при обработке широкополосных сигналов, зарегистрированных разреженной решеткой в акустическом волноводе

А.Л. Вировлянский[1,2,a], А.Ю. Казарова[2,b]

[1] *ИПФ РАН им. А.В. Гапонова-Грехова. 603951, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46.*

[2] *ННГУ им. Н.И. Лобачевского. 603022, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23.*

E-mail: [a]viro@ipfran.ru, [b]kazarova@ipfran.ru

Аннотация: Рассматривается ситуация, когда поле широкополосного точечного источника в подводном волноводе регистрируется вертикальной решеткой, которая является разреженной для большинства частот в полосе излученного импульса. Для реконструкции отсутствующих в принятых сигналах низкочастотных компонент, для которых решетка является плотной, применяется известное нелинейное преобразование автопроизведение. Принципиальная возможность такой реконструкции базируется на независимости амплитуд и эйконалов лучей в подводных волноводах от частоты. Методом численного моделирования продемонстрировано, что точность восстановления низкочастотных компонент поля может быть достаточной для оценки распределения его интенсивности в фазовом пространстве «глубина – угол – время». Расчет этой интенсивности выполняется с помощью заимствованного из квантовой теории разложения по когерентным состояниям. Данный подход применен при анализе данных натурных измерений звукового поля в озерном эксперименте, выполненных с использованием разреженной вертикальной решетки.

Ключевые слова: волновод, приемная решетка, автопроизведение, локализация источника.

Application of the autoproduct transformation in the processing of broadband signals recorded by a sparse array in an acoustic waveguide

A.L. Virovlyansky[1,2,a], A.Yu. Kazarova[1,b]

[1] *Federal Research Center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences. Nizhny Novgorod 603951, Russia.*

[2] *N.I. Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, 603022 Nizhny Novgorod, Russia*

E-mail: [a]viro@ipfran.ru, [b]kazarova@ipfran.ru

Abstract: A situation is considered when the field of a broadband point source in an underwater waveguide is recorded by a vertical array, which is sparse for most frequencies in the band of the emitted pulse. To reconstruct the low-frequency components missing in the received signals, for

which the array is dense, the known nonlinear transformation autoproduct is used. The fundamental possibility of such a reconstruction is based on the independence of the amplitudes and eikonals of the rays in underwater waveguides from the frequency. Numerical simulation has demonstrated that the accuracy of reconstructing the low–frequency components of the field can be sufficient to estimate the distribution of its intensity in the depth – angle – time phase space. The calculation of this intensity is performed using the coherent state method borrowed from quantum theory. This approach is applied in the analysis of data from field measurements of the sound field in a lake experiment performed using a sparse vertical array.

Keywords: waveguide, receiving array, autoproduct, source localization

PACS: 43.30.Dr

Введение

Одной из важных задач акустики океана является отыскание и анализ таких характеристик звуковых полей, которые относительно устойчивы к вариациям параметров подводного волновода и могут быть с приемлемой точностью предсказаны в условиях неизбежной неточности математической модели среды. В работе [1] показано, что такими характеристиками являются компоненты поля, формируемые узкими пучками лучей. При регистрации поля с помощью приемной вертикальной решетки такие компоненты могут быть выделены из суммарного поля на решетке с помощью заимствованного из квантовой теории метода когерентных состояний. Применение акустического аналога этого метода позволяет перейти от традиционного описания интенсивности на вертикальной приемной решетке как функции глубины и времени к более устойчивому к вариациям параметров среды распределению интенсивности в фазовом пространстве «глубина – угол прихода – время».

В данной работе рассматривается пример применения данного подхода в ситуации, когда решетка, используемая для регистрации поля широкополосного источника, является разреженной для большинства частот в полосе принимаемых сигналов. Использование преобразования автопроизведение позволяет реконструировать компоненты поля на низких частотах, отсутствующих в спектре излучения [2].

1 Озерный эксперимент

В данной работе мы анализируем данные измерений выполненных в озере Кинерет (Израиль) в 2019 году. Глубина озера в этом месте примерно постоянна и составляет около 40 м. Сигналы регистрировались с помощью приемной вертикальной решетки из 10 гидрофонов, а излучение выполнялось источником, опускаемым с борта дрейфующего судна. Источник, расположенный на глубине 10 м, излучал ЛЧМ импульсы длительностью 1 с в полосе частот от 300 до 3500 Гц. Расстояние между источником и решеткой составляло

380 м. Приемные гидрофоны перекрывали интервал глубин от 10 до 37 м с шагом 3 м. Принятые сигналы сжимались путем их корреляции с репликой первоначально излученного импульса.

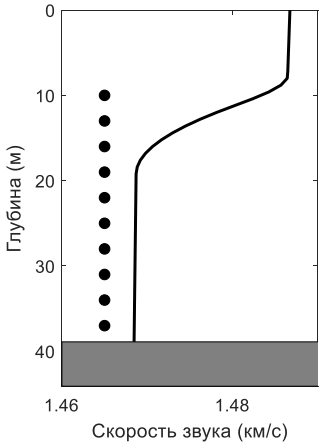


Рис. 1. Профиль скорости звука и глубины расположения приемников.

Профиль скорости звука, измеренный вблизи приемной решетки, показан на рис. 1. Точки показывают глубины приемных гидрофонов. При численном моделировании использовалась плоскослоистая модель волновода с данным профилем скорости звука.

Звуковое поле на дистанции наблюдения является функцией глубины z и времени t. Комплексную амплитуду поля в вертикальном сечении волновода представим в виде интеграла Фурье

$$v(z,t) = \int df\, u(z,f) e^{-2\pi i f t}.$$

Теоретический расчет Фурье-компонент поля $u(z,f)$ выполнялся методом нормальных мод с использованием программы KRAKEN.

2 Распределение интенсивности в фазовом пространстве "глубина – угол – время"

На фиксированной частоте f функция $u(z,f)$ задает глубинную зависимость комплексной амплитуды поля. От этой зависимости, следуя [1,3], перейдем к распределению амплитуды поля в фазовой плоскости (z,p), где $p=\sin\chi$, χ – угол скольжения. Переход осуществляется с помощью вспомогательной функции, представляющей акустический аналог квантовомеханического когерентного состояния, $Y(z',f,z,p) = \Delta_z^{-1/2} \exp\left(ikp(z'-z) - \dfrac{(z'-z)^2}{2\Delta_z^2} \right)$, где Δ_z – масштаб состояния, $k = 2\pi f/c_0$ – опорное волновое число, c_0 =1.5 км/с. Комплексная амплитуда поля в точке (z,p) равна $a(z,p,f) = \int dz'\, u(z',f) Y^*(z',f,z,p)$, где символ * означает комплексное сопряжение. Эта величина интерпретируется как амплитуда тонального сигнала на частоте f, приходящего на глубину z под углом χ. Поэтому плоскость (z,p) мы называем плоскостью "глубина – угол".

При работе с импульсными сигналами вводится функция [3] $b(z,p,t) = \int df\, a(z,p,f) e^{-2\pi i f t}$, которая интерпретируется как амплитуда сигнала, приходящего в точку (z,p) в момент времени t. Функцию $I(z,p,t) = |b(z,p,t)|^2$ мы называем распределением интенсивности поля в фазовом пространстве "глубина – угол –

время" (z, p, t). Благодаря отсутствию многолучевости в фазовом пространстве распределение $I(z, p, t)$ более устойчиво к вариациям параметров среды, чем распределение интенсивности исходного поля $|u(z,t)|^2$.

3 Преобразование автопроизведение

При обработке сигналов с антенной решетки переход в фазовое пространство базируется на процедуре вычислении амплитуды $a(z,p,f)$ с заменой интегрирования z суммированием по элементам приемной решетки. При этом межэлементное расстояние не должно заметно превышать половину длины волны. Однако в нашем случае для большинства частот в полосе излученного сигнала это условие нарушается. Ранее, в работе [3], мы анализировали те же экспериментальные данные, ограничиваясь исследованием низкочастотных компонент регистрируемого поля.

В данной работе используется альтернативный подход. Он базируется на применении преобразования автопроизведение [2], которое выражается соотношением $U(z, f) = \int_{F_1}^{F_2} dF\, u(z, F+f) u^*(z, F)$, где $0 < F_1 < F_2$ и предполагается, что частотный интервал $[F_1, F_2 + f]$ входит в полосу излученного сигнала. Ожидается, что функция $U(z, f)$ приближенно восстанавливает компоненту поля $u(z, f)$ на частотах f малых по сравнению с F_2. Принципиально важный момент заключается в том, что таким образом может быть реконструирована амплитуда сигнала даже на частоте f, не входящей в полосу излученного сигнала. Возможность такой реконструкции основана на независимости амплитуд и эйконалов лучей от частоты [2]. Остановимся на этом подробнее.

В приближении геометрической оптики $u(z, f) = S\sum_n A_n(z) e^{2\pi i f t_n(z)}$, где индекс n нумерует лучи, которые на дистанции наблюдения приходят на глубину z, A_n и t_n – не зависящие от частоты амплитуда и время прихода n-го луча. Символом S обозначен слабо зависящий от частоты спектр автокорреляционной функции излученного ЛЧМ импульса (корреляция с репликой излученного импульса используется для сжатия принятого сигнала). Преобразуя геометрооптическое выражение для $u(z,f)$, применяя автопроизведение, и опуская аргумент z у A_n и t_n, находим $U(z, f) = (F_2 - F_1) S \sum_n |A_n|^2 e^{2\pi i f t_n} + G$, где G – слагаемое, которым можно пренебречь при выполнении условия $(F_2 - F_1)\Delta t = O(1)$, где Δt – минимальная разность времен прихода лучей. Мы видим, что $u(z, f)$ и $U(z, f)$ формируются суммами из одинакового количества слагаемых с **разными** амплитудами, но **одинаковыми** фазами (эйконалами).

Поскольку пространственно-угловая структура компоненты поля, формируемой узким пучком лучей, определяется главным образом эйконалами лучей, можно ожидать, что распределение интенсивности $I(z,p,t)$, найденное с заменой $u(z,f)$ на $U(z,f)$, приближенно воспроизводит распределение, отвечающее истинной функции $u(z,f)$.

4 Сопоставление теории и эксперимента

Преобразование автопроизведение с F_1=300 Гц и F_2=2800 Гц было применено к сигналам, зарегистрированным приемной решеткой в озере Кинерет. Значения $U(z,f)$ вычислялись для частот f в интервале от 0 до 700 Гц. Следующим шагом стал переход от $U(z,f)$ к функции $\tilde{u}(z,f)=U(z,f)\exp\left(-\frac{\pi(f-f_c)^2}{\Delta f^2}\right)$, где f_c = 300 Гц и Δf = 250 Гц. Замена $u(z,f)$ на $\tilde{u}(z,f)$ позволяет приближенно реконструировать распределение интенсивности $I(z,p,t)$ в ситуации, когда точечный источник излучает звуковой импульс $s(t)=S\Delta_f \exp(-2\pi i f_c t-\pi\Delta_f^2 t^2)$.

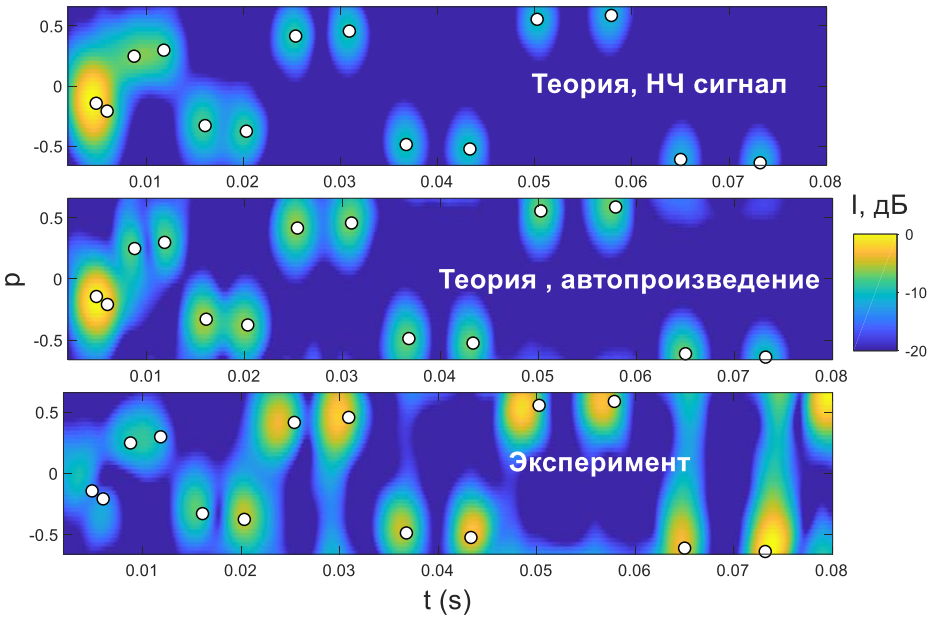


Рис. 2. Сечение распределения $I(z,p,t)$ плоскостью z = 20 м. Вверху: прямой расчет поля низкочастотного импульса. В середине: моделирование приема широкополосных ЛЧМ импульсов с использованием автопроизведения. Внизу: обработка данных измерений.

Для оценки точности восстановления это распределение было сопоставлено с результатом его теоретического расчета, выполненного двумя способами.

(i) **Прямой расчет поля на приемной решетке** на основе вычисления функций $u(z,f)$ в полосе частот от 0 до 700.

(ii) **Расчет с использованием преобразования автопроизведение.** Моделировалось распространение широкополосных ЛЧМ импульсов, описанных в разд. 1, и обработка с использованием преобразования автопроизведение.

На рис. 2 показаны сечения всех трех полученных вариантов распределения $I(z, p, t)$ плоскостью z =20 м. Белые кружки показывают точки, в которых эту плоскость пересекают лучевые траектории. Расположение областей повышенной интенсивности на всех трех графиках примерно совпадают.

Заключение

Графики, представленные на рис. 2 подтверждают вывод статьи [3] о том, что распределение $I(z, p, t)$ может быть приближенно рассчитано с использованием идеализированной модели среды.

Основным результатом данной работы является демонстрация эффективности использования преобразования автопроизведение для реконструкции распределения интенсивности звукового поля в фазовом пространстве "глубина – угол – время" при регистрации широкополосных сигналов с помощью разреженной решетки. Практическое значение этого результата связано с тем, что данное распределение может быть использовано в качестве входных данных при решении задачи локализации источника звука в подводном волноводе [3].

Мы благодарны нашим коллегам Б.Г. Кацнельсону и А.А. Лунькову, предоставившим данные измерений в озере Кинерет. Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН (проект FFUF-2024-0041).

Список литературы

1. *Virovlyansky A.L.* Stable components of sound fields in the ocean // J. Acoust. Soc. Am. 2017. **141**, N 2. P. 1180.
2. *Worthmann B.M., Dowling D.R.* The frequency-difference and frequency-sum acoustic-field autoproducts // J. Acoust. Soc. Am. 2017. **141**, N 6. P. 4579.
3. *Virovlyansky A.L., Kazarova A.Yu., Katsnelson B.G.* Phase space representation of sound fields in lake Kinneret // IEEE J. Oceanic Eng. 2023. **48**, N 4. P.1174.

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39450

Определение характеристик ветрового волнения методом акустического зондирования в дециметровом диапазоне: поиск технических решений

Салин М.Б.[1)], Ермошкин А.В.[1)], Костев Д.А.[1)], Разумов Д.Д.[1)]

[1)] *Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород.*
Тел.: +7(831) 418-90-58; Факс: (831) 418-91-27; E-mail: mikesalin@ipfran.ru

Доклад обобщает результаты цикла экспериментальных и теоретических исследований авторов в области рассеяния подводного звука на ветровом волнении .Акцент в докладе сделан на оценке возможностей решения обратной задачи рассеяния звука на ветровом волнении. Исходя из характеристик применявшихся в экспериментальных исследованиях гидроакустических систем, работающих в диапазоне длин волн от дециметров до метра, ожидалось, что рассеянный сигнал будет наиболее чувствителен к соответствующим длинам поверхностных волн, отвечающих условию Брэгговского резонанса и относящихся к спектральной области насыщения. Однако для использования эффекта брэгговского рассеяния в целях измерения характеристик волнения на практике необходимо учитывать технические ограничения гидроакустических систем и ряд сопутствующих эффектов. В экспериментах устойчиво регистрировалась компонента сигнала рассеяния, несоответствующая условию Брэгговского резонанса, которая создается из-за наличия мелких частиц (пузырьков) в приповерхностном слое, двигающихся вместе с полем течения длинных (энергонесущих) ветровых волн.

Ключевые слова: поверхностная реверберация, ветровое волнение, условие Брэгга

УДК: 551.463 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39451

Влияние ветрового волнения на эффективность пространственной обработки акустических сигналов в условиях неопределенности параметров океанического волновода

М.А.Раевский[1,a], В.Г.Бурдуковская[1,b]

[1] *ИПФ РАН. Нижний Новгород 603951, ул. Ульянова, 46*

E-mail: [a] raevsky@ipfran.ru, [b] bvg@ipfran.ru

Рассматривается влияние неопределенности акустических параметров океанического волновода на эффективность оптимального алгоритма пространственной обработки, использующего теоретическую модель когерентности сигнала.

Ключевые слова: мелкое море, когерентность сигнала, антенна, оптимальный алгоритм.

Influence of wind waves on the effectiveness of spatial processing of acoustic signals in conditions of uncertainty of the parameters of the oceanic waveguide

M.A.Raevsky[1,a], V.G.Burdukovskaya[1,b]

[1] *IAP RAS. 46 Ul'yanov Street, Nizhny Novgorod, 603951, Russia.*

E-mail: [a] raevsky@ipfran.ru, [b] bvg@ipfran.ru

The influence of uncertainty in the acoustic parameters of an ocean waveguide on the efficiency of an optimal spatial processing algorithm using a theoretical model of signal coherence is considered.

Keywords: shallow water, signal coherence, antenna, optimal algorithm.

PACS: 43.30.+m.

Введение

Совместное использование теоретических моделей когерентности сигналов и помех в океанических волноводах с флуктуирующими параметрами и оптимальных алгоритмов обработки сигналов позволяет повысить эффективность приемных антенных решеток (АР). В соответствующих публикациях (смотри, например,[1-3]) анализировалось влияние ветрового волнения и фона случайных внутренних волн на коэффициент усиления приемных АР с горизонтальной и вертикальной апертурой. При этом остается неизученным вопрос влияния неточной информации относительно параметров океанического волновода, которые в предыдущих публикациях предполагались полностью известными. В реальных условиях параметры, которые используются при моделировании корреляционных матриц сигналов и

помех, известны с некоторой неопределенностью. Это неизбежно приведет к эффектам рассогласования результатов моделирования с реальными корреляционными матрицами сигналов и помех и, следовательно, к уменьшению эффективности оптимальных алгоритмов обработки. Здесь мы рассмотрим влияние такой неопределенности параметров волновода на коэффициент усиления вертикальной АР в мелком море. Предполагается, что флуктуации сигнала обусловлены развитым ветровым волнением.

Основные соотношения и результаты моделирования

Представим поле в виде разложения по собственным функциям $\varphi_p(z)$:

$$p(r,z,t)=\sum_p \frac{a_p\varphi_p(z)}{\sqrt{k_p r}}\ \exp\left[i\left(k_p r-\omega_0 t-\pi/4\right)\right],$$

где a_p – амплитуды мод, k_p – действительная часть волновых чисел, ω_0 - частота излучения, r – расстояние. Для корреляционной матрицы поля давления на апертуре вертикальной АР в работе [1] было получено выражение:

$$N_{mn}=C_m C_n^*+\sum_p (k_p r)^{-1}\varphi_p(z_m)\varphi_p(z_n)\left[N_p(r)-\varphi_p^2(z_u)\exp\left\{-2\left(\gamma_p+\left|\mathrm{Im}\,k_p\right|\right)r\right\}\right] \quad (1)$$

$$C_m=\sum_p (k_p r)^{-\frac{1}{2}}\varphi_p(z_u)\varphi_p(z_m)\exp\left[ik_p r-\left(\gamma_p+\left|\mathrm{Im}\,k_p\right|\right)r\right]$$

где γ_p – декремент затухания когерентной компоненты модовой амплитуды a_p, $\mathrm{Im}\,k_p$ – мнимая часть волнового числа, z_n – глубина элементов АР. Функция $N_p(\vec{r})=\left\langle\left|a_p(\vec{r},t)\right|^2\right\rangle$ рассчитывается на основании уравнения переноса [1]:

$$\frac{\partial N_p(x)}{\partial x}=\sum_{p_2} W_{pp_2}N_{p_2}(x)-2\left(\gamma_p+\left|\mathrm{Im}\,k_p\right|\right)N_p(x)$$

где γ_p и W_{pp_2} выражаются через частотный спектр ветрового волнения $B(\Omega)$, волновые числа k_p и производные собственных функций на поверхности z=0. Для частотного спектра $S(\Omega)$ рассматривается общепринятая модель JONSWAP. В качестве помехи предполагается океанический шум, для которого будем использовать модель пространственно белого шума.

Рассмотрим теперь основные соотношения, которые будут использоваться при моделировании эффектов рассогласования параметров реального и модельного волноводов. Будем при этом анализировать квадратичную обработку сигнала на апертуре АР [4]. Обозначим векторы входного сигнала и шума **s** и **n**, соответственно, и будем полагать, что они являются Гауссовыми случайными процессами. Квадратичная обработка сигнала имеет вид:

$$d=\mathbf{x}^{\mathrm{H}}\mathbf{A}\mathbf{x}$$

где **x**=**s**+**n**, **A** – произвольная квадратная матрица размерности $M \times M$ (M – число элементов АР). Для отношения сигнал/шум (ОСШ) на выходе квадратичного процессора в [4] (обозначим его ρ) получено выражение:

$$\rho = \frac{\mathrm{tr}(\mathbf{AN})}{\left[\mathrm{tr}(\mathbf{AR})^2\right]^{\frac{1}{2}}} \tag{2}$$

Здесь $\mathrm{tr}(\ldots)$ – trace, то есть сумма диагональных элементов матрицы, **R** – корреляционная матрица шума. Это отношение имеет максимум для оптимальной матрицы $\mathbf{A}_{\text{опт}}$, которая в интересующем нас случае малого отношения сигнал/шум имеет вид $\mathbf{A}_{\text{опт}}=\mathbf{R}^{-1}\ \mathbf{N}\ \mathbf{R}^{-1}$. Соответственно, для оптимального значения $\rho_{\text{опт}}$ получаем:

$$\rho_{\text{опт}} = \left[\mathrm{tr}\left(\mathbf{R}^{-1}\mathbf{N}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} \tag{3}$$

Рассмотрим теперь эти результаты применительно к океаническому волноводу. Если его параметры достоверно известны, то моделируются матрицы **N** и **R** и при оптимальной матрице квадратичного алгоритма $\mathbf{A}_{\text{опт}}=\mathbf{R}^{-1}\ \mathbf{N}\ \mathbf{R}^{-1}$ мы получаем максимальное отношение сигнал/шум (3) на выходе квадратичного процессора. В этом случае можно говорить о согласовании обработки сигнала с волноводом. В реальных условиях параметры волновода известны с некоторой неопределенностью. Соответственно, матрицы сигнала и шума (обозначим $\tilde{\mathbf{N}}$ и $\tilde{\mathbf{R}}$) также будут отличаться от достоверных корреляционных матриц **N** и **R**. Матрицу $\tilde{\mathbf{A}} = \tilde{\mathbf{R}}^{-1}\tilde{\mathbf{N}}\tilde{\mathbf{R}}^{-1}$ в этом случае следует рассматривать как субоптимальную, а для выходного ОСШ $\tilde{\rho}$ из (2) получаем значение

$$\tilde{\rho} = \frac{\mathrm{tr}\left(\tilde{\mathbf{R}}^{-1}\tilde{\mathbf{N}}\tilde{\mathbf{R}}^{-1}\mathbf{N}\right)}{\left[\mathrm{tr}\left(\tilde{\mathbf{R}}^{-1}\tilde{\mathbf{N}}\tilde{\mathbf{R}}^{-1}\mathbf{R}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}}$$

Это значение во всех случаях меньше $\rho_{\text{опт}}$, определяемого формулой (3). Для дальнейшего удобно ввести понятие коэффициента согласования $\eta = \tilde{\rho}/\rho_{\text{опт}}$, для которого в случае белого шума (**R**=**E**) имеем выражение:

$$\eta = \frac{\mathrm{tr}\left(\tilde{\mathbf{N}}\mathbf{N}\right)}{\left[\mathrm{tr}\left(\tilde{\mathbf{N}}^2\right)\right]^{\frac{1}{2}}\left[\mathrm{tr}\left(\mathbf{N}^2\right)\right]^{\frac{1}{2}}} \tag{4}$$

Рассмотрим мелкое море с глубиной H=100 м. Выберем следующие характеристики волновода: линейный профиль скорости звука с положительным градиентом $dc/dz = 10^{-1}$ с$^{-1}$, скорость звука на поверхности $c(z=0)$ = 1500 м/с, донный грунт – неконсолидированные осадки с типичными параметрами: ρ_0 = 2 г/см^3, c_l =1700 м/с, коэффициент затухания δ =

0.2 дБ/(км·Гц). Источник с частотой излучения f = 250 Гц либо 500 Гц расположен на глубине $z_и$ = 50 м. Вертикальная АР с межэлементным расстоянием $d = \lambda/2$ имеет M = 31 элемент на частоте f = 250 Гц либо M = 61 элемент на частоте f = 500 Гц, нижний элемент АР находится на глубине z = 100 м. При моделировании предполагается скорость ветра V=10 м/с, либо скорость ветра V=15 м/с. Расстояние от источника меняется в пределах 5 км ≤ R ≤ 150 км. Для этого волновода моделируется корреляционная матрица сигнала.

Чтобы проанализировать эффективность квадратичной обработки при неточной информации о параметрах океанического волновода, параллельно рассчитывается корреляционная матрица сигнала $\tilde{\mathbf{N}}$ для волновода с измененными параметрами дна $\tilde{c}_l, \tilde{\rho}, \tilde{\delta}$ и вариациями профиля скорости звука, после чего вычисляется коэффициент согласования (4). Для уменьшения разброса его значений, обусловленного эффектами интерференции мод, будем анализировать зависимости $\eta(R)$, сглаженные по дистанции на интервале $\Delta R = 10$ км.

На Рис.1 приведены результаты численных расчетов коэффициента согласования η при изменении скорости звука в донных осадках на 100 м/с м 200 м/с для частоты сигнала f = 250 Гц и 500 Гц при умеренном и сильном ветровом волнении.

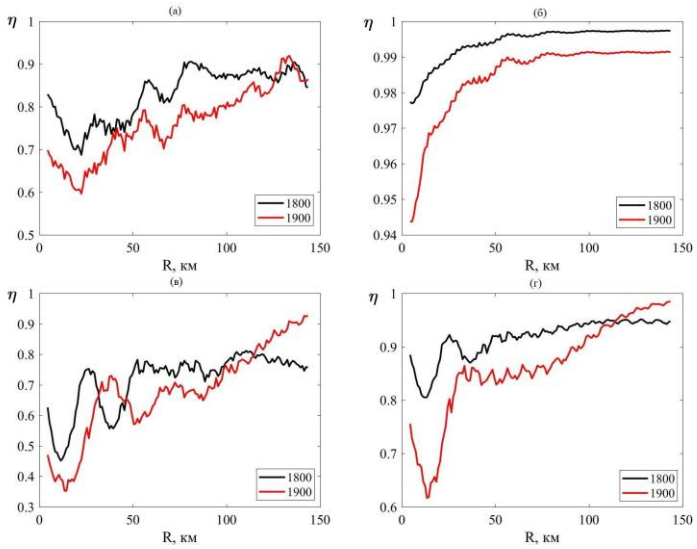


Рис.1. Коэффициент согласования при изменении скорости звука в дне: (а),(б) – f=500 Гц, (в),(г) – f=250 Гц, (а),(в) – V=10 м/с, (б),(г) – V=15 м/с.

Видно, что на коротких дистанциях R<50 км эффекты рассогласования оптимальной обработки сигнала могут быть существенны (минимальные значения η порядка 0.4÷0.6), но с увеличением дистанции значения η растут и приближаются к значениям 0.8÷0.95. Аналогичное моделирование проделано при изменении плотности грунта на 25% ($\tilde{\rho}_0 = 1.5$ г/см^3). В этом случае также получено, что при R<50 км эффекты рассогласования оптимальной обработки сигнала могут быть значимы (минимальные значения η порядка 0.4÷0.6), но с увеличением дистанции значения η растут и приближаются к значениям

0.8÷0.95. Вариации коэффициента затухания в дне δ, наоборот, приводят к крайне малым эффектам рассогласованиям. Значительные изменения δ в диапазоне $0.1<\delta<0.3$ дБ/(км·Гц) приводят к значениям коэффициента согласования η, отличие которых от единицы не более 2%. Влияние вариаций профиля скорости звука в волноводе рассмотрено путем изменения значений градиента dc/dz) в диапазоне $0\le dc/dz\le 0.2$ c^{-1}. Соответствующие результаты моделирования приведены на Рис.2. Видно, что значения η лежат в диапазоне 0.4÷0.7 на коротких дистанциях, а на удалении АР от источника более 50 км увеличиваются и меняются в пределах 0.7÷0.9.

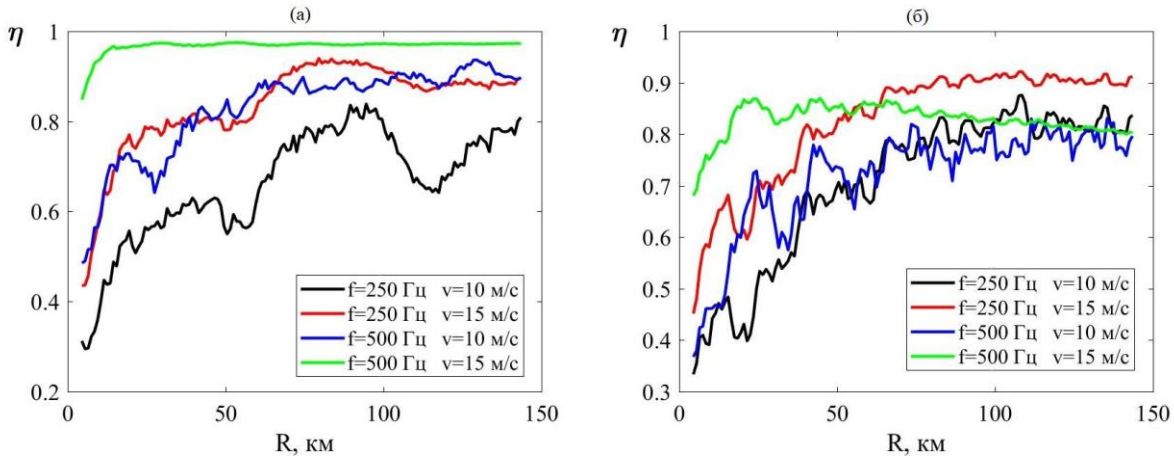


Рис.2. Коэффициент согласования при изменении профиля скорости звука: справа – изоскоростной волновод, слева – волновод с градиентом 0.2 c^{-1}.

Отметим, что значительное рассогласование на коротких дистанциях определяется влиянием когерентной компоненты сигнала (см. первое слагаемое в формуле (1)), наиболее чувствительной к фазам нормальных мод, а значит и к изменениям параметров волновода. По мере затухания когерентной компоненты, корреляционная матрица сигнала определяется, в основном, некогерентной компонентой сигнала, которая уже не зависит от фаз нормальных мод и поэтому менее реагирует на изменение параметров волновода.

Заключение

Рассматривается влияние неопределенности исходных данных об акустических параметрах океанического волновода на эффективность использования модели когерентности акустических сигналов совместно с оптимальным квадратичным алгоритмом пространственной обработки. В отличие от предыдущих исследований, где предполагалось, что параметры океанического волновода достоверно известны, рассматривается роль неточности параметров, используемых при моделировании корреляционной матрицы сигнала. Конкретные результаты получены для вертикальной АР мелководного волновода с гидрологией зимнего типа. Предполагается, что флуктуации акустического поля в волноводе обусловлены ветровым волнением. Обсуждаются результаты расчетов коэффициента

рассогласования квадратичного процессора из-за неточности параметров донного грунта и профиля скорости звука. Показано, что на малых дистанциях эффекты рассогласования могут быть существенны ($\eta(R)$ имеет характерные значения 0.4÷0.6), но с увеличением расстояния эти эффекты уменьшаются и значения коэффициента согласования близки к единице. Таким образом, снижение ОСШ на выходе квадратичного процессора не превышает 4 дБ на расстояниях до 50 км и не более децибела на дистанции 100÷150 км. На основании проделанного исследования можно сделать вывод о достаточно высокой эффективности совместного использования теоретической модели когерентности сигнала и квадратичного алгоритма обработки в натурных условиях.

Список литературы

1. *Раевский М.А., Бурдуковская В.Г.* Моделирование коэффициента усиления вертикальной антенны в мелководном волноводе со взволнованной поверхностью // Акуст. журн. 2024. **70**, № 2. С. 232.
2. *Раевский М.А., Бурдуковская В.Г.* Совместное влияние ветрового волнения и внутренних волн на когерентность низкочастотных акустических сигналов и эффективность их пространственной обработки в мелком море// Акуст. журн. 2024. **70**, № 4. С. 592.
3. *Раевский М.А., Бурдуковская В.Г.* Совместное влияние внутренних волн и ветрового волнения на коэффициент усиления вертикальной антенны в мелком море // Акуст. журн. 2025. **71**, № 5. С. 685.
4. *Dennis R. Morgan, Thomas M. Smith* Coherence effects on the detection performance of quadratic array processors, with applications to large-array matched-field// J. Acoust. Soc. Am.1990. **87**, №2. P.737.

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39452

Интегрированная навигационная система для морской 3d сейсморазведки с использованием буксируемых сейсмокос. Результаты тестирования на реальных данных

Ларичев В.А., Смирнов В.А., Корольков З.А., Максимов Г.А.

Акустический институт им. академика Н.Н. Андреева, г. Москва;

E-mail: gamaximov@mail.ru

Технология высокопроизводительной морской 3D сейсморазведки на шельфе предполагает использование специализированных судов с навигационно геофизическим комплексом, состоящим из буксируемых сейсмокос, пневмопушек, параванов и концевых буев, акустических систем позиционирования, навесных модулей управления по глубине и латерали, систем спутниковой навигации и радиосвязи. Все эти системы должны работать в единой связке под управлением интегрированной навигационной системы (ИНС). Практически все используемые до недавнего времени ИНС имели иностранное происхождение и, соответственно, подпали под санкционные ограничения. Таким образом, разработка отечественной ИНС для морского комплекса 3D сейсморазведки представляется крайне актуальной задачей, которая была успешно реализована в АО «АКИН» в 2024 году при поддержке Минпромторга РФ в рамках программы импортозамещения.

В докладе представлена информация об ИНС «ИНСИНАВ», разработанной в АО «АКИН», и результатах тестирования этой системы на реальных данных.

Ключевые слова: морская сейсморазведка, интегрированная навигационная система, системы акустического позиционирования

УДК: 534.4, 534–143, 57.084.1. DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39453

Статистические модели гидроакустического шумового фона мелководных прибрежных акваторий

С.В. Горовой[1,2]

[1]*Дальневосточный федеральный университет. 690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10.*

[2]*Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН.*

690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43.

E-mail: GorovoySV@mail.ru

В докладе приведены результаты исследования применимости отрезка ряда Грама–Шарлье и суммы гауссовских распределений в качестве моделей эмпирической плотности распределения вероятностей (ПРВ) последовательных мгновенных значений гидроакустических (ГА) шумов, воспринимавшихся комбинированным приемником (КП) в мелководной прибрежной акватории в условиях помех судоходства и импульсных помех, создаваемых «щелкающими» морскими обитателями (мелкие раки, крабы и др.). Показано, что в данной помеховой ситуации в качестве модели ПРВ мгновенных значений ГА шума, воспринимаемого входящими в состав КП приемником звукового давления и приемниками горизонтальных компонент его градиента, можно использовать сумму гауссовских распределений, в которой удержаны три члена, подобранные так, чтобы один из них описывал общий вид модели ПРВ, а второй и третий – уточняли свойства модели вблизи моды и хвостов распределения.

Ключевые слова: гидроакустические шумы, мелкое море, векторно-скалярные приемники

Statistical Models of Hydroacoustic Background Noise shallow coastal areas

S.V. Gorovoy[1,2]

[1]*Far Eastern Federal University. Campus 10 Ajax Bay, Russky Island, Vladivostok 690922 Russia.*

[2]*V.I. Ilyichev Pacific Oceanological Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences. Russia, Primorsky Kray 690041, Vladivostok, Baltiyskaya 43.*

E-mail: GorovoySV@mail.ru

The report presents the results of the study of the applicability of the Gram–Charlier series segment and the sum of Gaussian distributions as models of the empirical probability density function (PDF) of successive instantaneous values of hydroacoustic (HA) noises perceived by the combined receiver

(CP) in shallow coastal waters under conditions of ship noises and impulse interference created by "clicking" marine life (small crayfish, crabs, etc.). It is shown that in this interference situation, the sum of Gaussian distributions can be used as a model of the PDF of the instantaneous values of the sea noise perceived by the sound pressure receiver and the receivers of the horizontal components of its gradient, in which three terms are retained, are selected so that one of them describes the general appearance of the PDF, and the second and third specify the properties of the model near the mode and tails of the distribution.

Keywords: hydroacoustic noises, shallow sea, vector-scalar receivers

PACS: 43.60.+d, 43.58.+z

Введение

Исследование характеристик гидроакустических (ГА) шумов и совершенствование их теоретических и феноменологических моделей продолжаются более 70 лет как в России, так и за рубежом [1–3]. В условиях нестационарных помех, характерных для мелководных прибрежных акваторий, для решения, в реальном масштабе времени, задач обнаружения, измерения параметров и классификации ГА сигналов и источников шумоизлучения требуются модели, описывающие плотности распределения вероятностей (ПРВ) мгновенных значений звукового давления и др. параметров ГА шумов «здесь и сейчас», на последовательных интервалах времени, соответствующих длительностям ожидаемых (принимаемых) сигналов, которые составляют, в диапазоне частот 10–4000 Гц, десятые доли – единицы секунд.

Далее рассматриваются вопросы применимости одномерного гауссовского распределения, отрезка ряда Грама–Шарлье [4] и суммы гауссовских распределений [5–7] в качестве моделей, которые адекватны, на интервалах порядка десятых долей–единиц секунд, эмпирическим ПРВ последовательных мгновенных значений звукового давления и компонент его градиента ГА шумов в мелководной прибрежной акватории в условиях импульсных помех, создаваемых «щелкающими» морскими обитателями. В качестве оценок эмпирических ПРВ используются гистограммы.

Экспериментальные данные и их модели

В качестве экспериментальных данных использованы ГА шумы, зарегистрированные в светлое время суток с помощью комбинированного приемника (КП) в мелководной прибрежной акватории залива Петра Великого Японского моря при приближении и удалении моторной лодки [9, 10]. Во время регистрации шумов на удалениях менее 2 миль судов не

было видно, состояние моря – 2 балла. Район проведения исследований характеризуется повышенным уровнем подводного шума антропогенного происхождения и наличием широкополосных импульсных помех, создаваемых «щелкающими» морскими обитателями (морские ракообразные и др.). Данные импульсные помехи образуют зависящую от погодных условий и времени суток нестационарную случайную последовательность. Такие помехи наблюдаются в прибрежных акваториях залива Петра Великого Японского моря при температуре воды выше 15°С.

Глубина места в точке установки КП – 6 м, расстояние до уреза воды – 100 м, дно – песок, камни, наклон дна при удалении от берега не более 15°. Использовался КП, состоящий из двухкомпонентного приемника градиента давления (ПГД) инерционного (соколеблющегося) типа с двумя ортогонально ориентированными в горизонтальной плоскости чувствительными элементами (векторные каналы x и y) и расположенного рядом с ним ненаправленного приемника звукового давления (ПД, канал p). КП был установлен вблизи дна и ориентирован так, чтобы направления максимальной чувствительности каналов x и y составляли углы 45º к нормали к кромке прибоя. Для дискретизации сигналов использовались 16-разрядные АЦП, частота дискретизации f_s = 10 кГц.

На рис. 1 показаны осциллограммы и спектрограммы сигналов p, v_x и v_y, поступавших с ПД и чувствительных элементов каналов x и y ПГД в полосе частот 4–4000 Гц. Масштабы уровней условные, разрешающая способность по частоте на спектрограммах 1 Гц. На осциллограммах видны создаваемые морскими обитателями импульсные помехи. Моторная лодка приблизилась со стороны глубокой воды по прямой, под углом ~ 45º к кромке прибоя, в направлении максимума характеристики направленности канала x. На расстоянии порядка 300 м от берега лодка повернула на 45º и двигаясь параллельно берегу удалилась. Наименьшее расстояние, ~ 150 м, между КП и моторной лодкой наблюдалось в 175 с. Сведения об использованном КП и временно́й изменчивости характеристик, зарегистрированных в данном эксперименте шумов приведены в [8, 9].

На рис. 2 представлены 5 с фрагменты осциллограмм сигналов, рис. 1, в полосе частот Δf=150 – 1500 Гц. Рамками на них выделены интервалы длительностью 1 с, использованные для анализа. Интервал 100–105 с соответствует шумам акватории, на нем расстояние от КП до моторной лодки превышало 300 м. Здесь на каждом 1 с промежутке наблюдаются три и более нерегулярно следующих случайных импульса, создаваемых морскими обитателями. На интервале 173–178 с моторная лодка была наиболее близко от КП, ее шум превышал по уровню многие из импульсов, создаваемых морскими обитателями.

Для описания эмпирических ПРВ мгновенных значений шумов различного происхождения, в случае недостаточности использования, в качестве модели, гауссовского

закона распределения вероятностей, находят применение более сложные модели. Наиболее общими являются модели, предложенные Д. Миддлтоном [5].

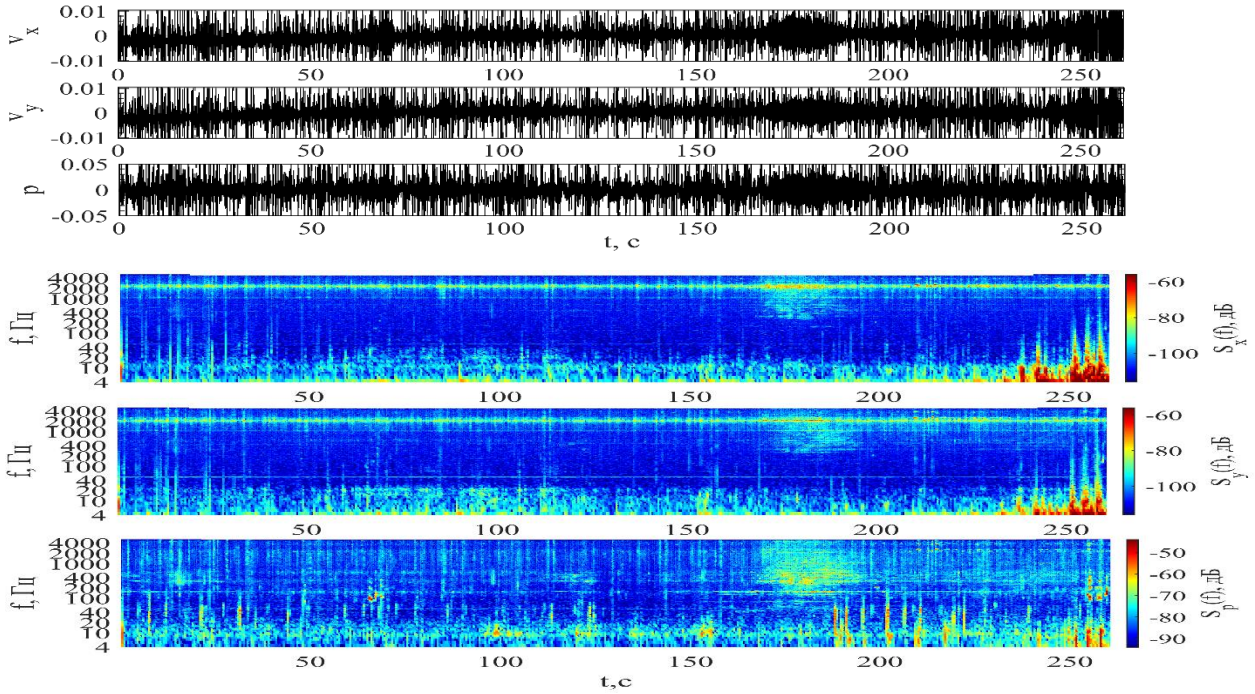


Рис. 1 Осциллограммы и спектрограммы сигналов v_x, v_y, p

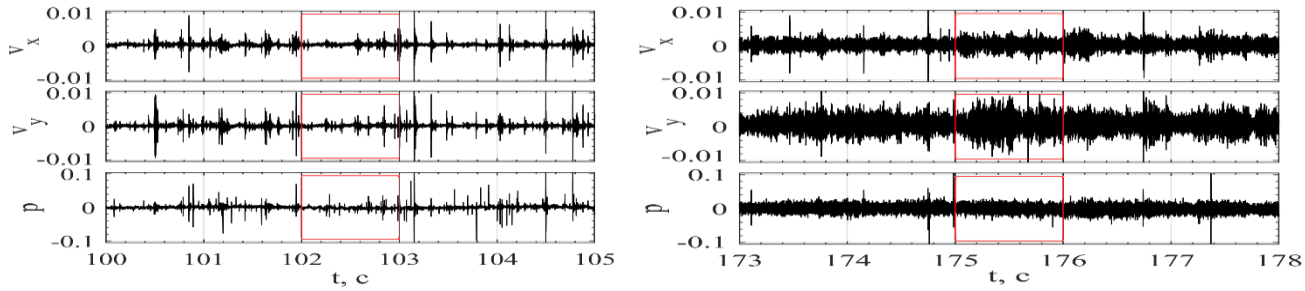


Рис. 2. Фрагменты осциллограмм, показанных на рис. 1

В системах реального времени и при «относительно небольших» отклонениях от гауссовского закона распределения вероятностей достаточным представляется использование в качестве моделей ПРВ ГА шума отрезка ряда Грама–Шарлье типа А [5] и суммы гауссовских распределений (Gaussian–Gaussian Mixture Models, GGM) [7, 8].

Вопрос о целесообразности использования в прикладных задачах на частотах ниже 4 кГц при времени наблюдения порядка десятых долей – единиц секунд более сложных моделей ПРВ мгновенных значений является спорным. Основной интерес в задачах обнаружения, измерения параметров и классификации сигналов и источников шумоизлучения при малых отношениях сигнал/помеха представляют хвосты распределения, в которые попадает слишком малое количество независимых значений, чтобы можно было делать содержательные выводы.

Ряд Грама–Шарлье типа А (Gram–Charlier A-series) определяется соотношением:

$$f(x) = w(x)\left[1 + \frac{1}{6}\mu_3 H_3(x) + \frac{1}{24}(\mu_4 - 3)H_4(x) + \cdots\right], \quad (1)$$

где $f(x)$ – модель ПРВ, $w(x)$ – плотность нормированного гауссовского распределения, $H_3(x) = x^3 - 3x$, $H_4(x) = x^4 - 6x^2 + 3$ – полиномы Чебышёва–Эрмита 3-го и 4-го порядков, μ_3, μ_4 – 3-й и 4-й центральные моменты распределения $f(x)$. Значения μ_3, и μ_4 обычно неизвестны, вместо них используют их экспериментальные оценки M_3 и M_4.

Модель ПРВ в виде суммы гауссовских распределений имеет вид соотношения [7, 8]:

$$f(x) = \sum_{i=1}^{M} K_i w(x, \sigma_i), \quad (2)$$

где $f(x)$ – модель ПРВ, $w(x, \sigma_i)$ – плотности ненормированных гауссовских распределений с нулевыми математическими ожиданиями и средними квадратическими отклонениями σ_i, M – количество учитываемых компонент K_i – численные коэффициенты, определяющие «веса» отдельных компонент, $\sum_{i=1}^{M} K_i = 1$.

На графиках, рис. 3, ступенчатыми линиями показаны нормированные к (0, 1) гистограммы и оценки ПРВ сигналов v_x и p в полосе частот 150 – 1500 Гц на 1 с интервалах 102–103 с (а, б) и 175–176 с (в, г), см. рис. 2.

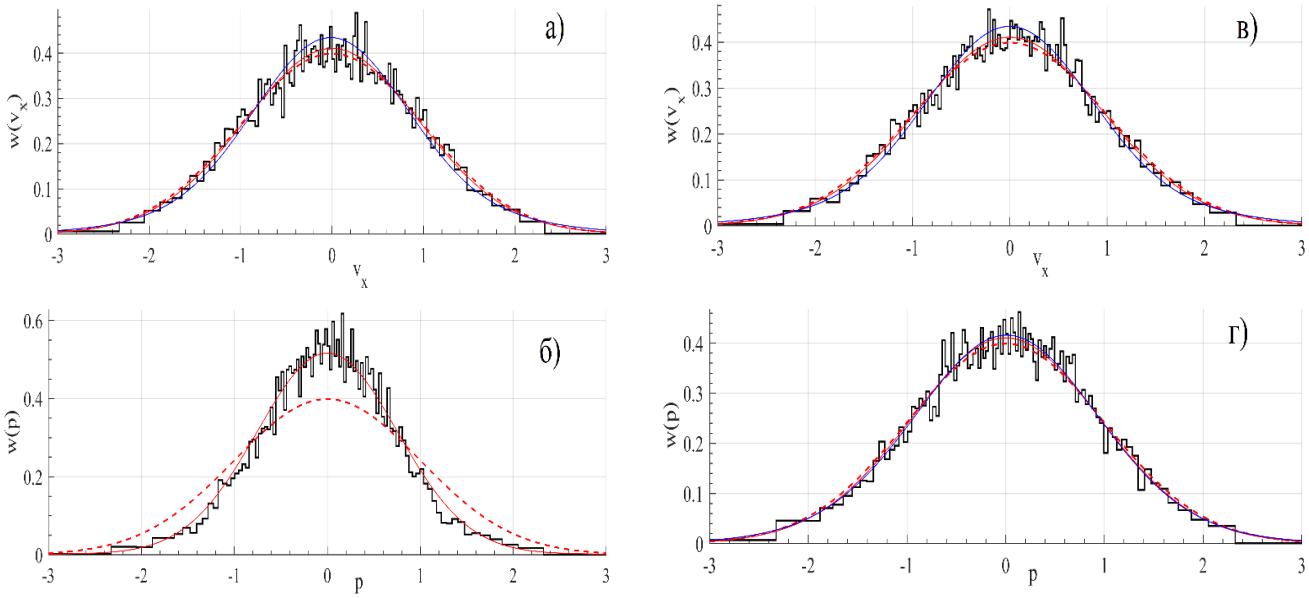


Рис. 3. Гистограммы и оценки ПРВ сигналов v_x и p на интервалах 102–103 с (а, б) и 175–176 с (в, г). Пунктирными линиями показаны нормированные гауссовские распределения

Пунктирными линиями показаны нормированные гауссовские распределения, синими линиями показаны оценки ПРВ в виде отрезка ряда Грама–Шарлье, учитывающие вклад составляющих, зависящих от M_3 и M_4. Красными линиями показаны оценки ПРВ в виде суммы трех гауссовских распределений с нулевыми математическими ожиданиями и

среднеквадратическими отклонениями, равными 1, 0.75, 4 (для уточнения «базовой составляющей», подъема в области моды и «тяжелых хвостов» соответственно). Для построения гистограмм использовалось 100 интервалов группировки, их ширина выбиралась так, чтобы при гауссовском распределении вероятность попадания в каждый из них была равна 0.01. При f_s = 10 кГц и длительности интервалов наблюдения 1 с, для гауссовского распределения в каждый из интервалов группировки при этом должно попадать 100 (зависимых) выборочных значений. Были выполнены построения гистограмм и моделей (1), (2) и для других времен накопления и частотных областей

Заключение

Анализ графиков, показанных на рис. 3 и моделей ПРВ мгновенных значений ГА шума, рис. 1, на интервалах наблюдения 0.1 – 10 с в различных областях диапазона частот 4 – 4000 Гц позволяют сделать следующие выводы:

1. Если шумы плавсредств не преобладают над импульсными помехами от щелкающих морских обитателей, наибольшие отличия ПРВ мгновенных значений от гауссовского закона: подъем в области моды и хвостов распределения наблюдаются у шумов, воспринимаемых ПД (рис. 3 а, б). При преобладании создаваемых судами шумов над шумами акватории отличия от гауссовского закона ПРВ мгновенных значений у шумов, воспринимаемых ПД и горизонтальными каналами ПГД примерно одинаковые (рис. 3 в, г).

2. В качестве моделей ПРВ мгновенных значений сигналов, воспринимаемых как ПД, так и горизонтальными каналами ПГД в данной помеховой обстановке в акватории достаточно использовать суммы гауссовских распределений (2) в которых удержаны три члена, у которых среднеквадратические отклонения и весовые коэффициенты подобраны так, чтобы один из них описывал общий вид ПРВ, а второй и третий – уточняли свойства модели вблизи моды и хвостов распределения (см также [7, 8]).

3. Использование отрезка ряда Грама–Шарлье типа А (1) в качестве модели ПРВ допустимо в меньшем количестве случаев. Так для шума акватории, воспринимаемого ПД, при наличии импульсных помех, рис. 3 б) при использовании (1) в области хвостов распределения были получены отрицательные значения, не имеющие физического смысла (т.к. полиномы $H_3(x)$, $H_4(x)$, … принимают, в т.ч., и отрицательные значения [4]).

4. Расчет параметров моделей в виде отрезка ряда Грама–Шарлье типа А (1) и суммы гауссовских компонент (2) на современных одноплатных компьютерах выполняется менее чем за 1 с. Это позволяет использовать данные модели для формирования отношений правдоподобия и пороговых уровней в реальном масштабе времени.

Работа выполнена в рамках НИР «Разработка методологии исследования сложных акустических систем и сред». Регистрационный номер: 124022100075-6.

Список литературы

1. *Курьянов Б.Ф.* Развитие представлений о низкочастотных шумах океана за 50 лет // Сборник трудов VII школы–семинара акад. Л.М. Бреховских.– М.: ГЕОС, 1998.

2. *Ярощук И.О., Гулин О.Э.* Метод статистического моделирования в задачах гидроакустики. Владивосток: Дальнаука, 2002.

3. *Carey W.M.* Ocean Ambient Noise. Measurement and Theory / New York: Springer, 2011.

4. *Крамер Г.* Математические методы статистики. М.: Государственной издательство иностранной литературы, 1948.

5. *Middleton, D.* Non–Gaussian Noise Models in Signal Processing for Telecommunications: New Methods and Results for Class A and Class B Noise Models // IEEE Transactions on Information Theory. 1999. **45**. N 4.– P. 1129.

6. *Bouvet M, Schwartz S. C.* Underwater noises: Statistical modeling, detection, and normalization // The Journal of the Acoustical Society of America. 1988.– **83**. N 3. P. 1023.

7. *Bond J.W., Stein J., Zeidler J.* Gaussian Mixture Models for Acoustic Interference.– USA, Technical Report 1667 AD–A285 950 DTIC, 1994.

8. *Горовой С.В.* Сравнительный анализ характеристик сигналов, зарегистрированных с использованием векторного приемника и гидрофона давления на мелководье // Сборник трудов XXXVI сессии Российского акустического общества. М.: ГЕОС. 2024. С. 77.

9. *Горовой С.В.* Некоторые результаты исследования временной изменчивости характеристик гидроакустических шумов на мелководье // Сборник трудов XXXVII сессии Российского акустического общества. М.: ГЕОС. 2025. С. 333.

УДК: 534.2; 534.6; 551.463.288; 621.3; 629.5.01 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39454

Проблемы измерения подводного шума гражданских судов в условиях Арктики

П.Л. Остроумова[1,a)], О.В. Пальникова[1,b)], М.И. Розанов[1,c)]

[1)] ФГБОУ ВО «СПбГМТУ», Санкт-Петербург 190121, Россия

E-mail: [a]ms.ostroumova.polina@mail.ru, [b]okspal2025@yandex.ru, [c]mirznv@list.ru

Аннотация: Интенсификация судоходства по Северному морскому пути (СМП) сопровождается усилением техногенного воздействия на морские экосистемы, ключевым компонентом которого является подводный шум. В Российской Федерации отсутствуют утверждённые методики измерения судоходных трасс. Для решения данной задачи в рамках мониторинга акустической обстановки предлагается оригинальная конструкция автономного измерительного комплекса. Устройство представляет собой заякоренный притопленный буй-носитель аппаратуры с минимальным энергопотреблением, связанный кабелем с радиобуем, способным периодически всплывать на поверхность для передачи собранной информации об акустической обстановке. Конструктивная схема обеспечивает длительное функционирование и возможность эксплуатации в сложных условиях арктических морей, включая акватории с сезонным ледовым покровом, что делает его перспективным для фонового акустического мониторинга трасс СМП.

Ключевые слова: суда, подводный шум, арктические акватории, измерительное устройство, заякоренный буй-носитель аппаратуры, привязной всплывающий радиобуй.

Problems of measuring underwater noise from civil vessels in the Arctic

P.L. Ostroumova[1,a)], O.V. Palnikova[1,b)], M.I. Rozanov[1,c)]

[1)]Saint Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg 190121, Russia

E-mail: [a]ms.ostroumova.polina@mail.ru, [b]okspal2025@yandex.ru, [c]mirznv@list.ru

Abstract: The intensification of shipping along the Northern Sea Route (NSR) is accompanied by increasing anthropogenic impacts on marine ecosystems, a key component of which is underwater noise. The Russian Federation lacks approved methods for measuring shipping lanes. To address this issue, a unique design for an autonomous measuring system is proposed for monitoring the acoustic environment. The device is a moored, submerged buoy carrying equipment with minimal power consumption, connected by cable to a radio beacon capable of periodically surfacing to transmit collected acoustic information. Its design ensures long-term

operation and the ability to operate in challenging Arctic sea conditions, including waters with seasonal ice cover, making it ideal for background acoustic monitoring of the NSR.

Keywords: vessels, underwater noise, Arctic waters, measuring device, moored buoy-carrier of equipment, tethered pop-up radio beacon.

1. Освоение Северного морского пути: перспективы и проблемы

Интенсификация освоения Арктической зоны Российской Федерации и развитие инфраструктуры Северного морского пути (СМП) как национальной транспортной артерии приводят к устойчивому росту грузопотока. С каждым годом фиксируется увеличение количества судозаходов и тоннажа транспортного флота, включая крупнотоннажные газовозы, танкеры и контейнеровозы. Освоение СМП — стратегическая задача, направленная на рост интенсивности судоходства. Основной рост обеспечивает внешний трафик, модернизация ледокольного флота, развитие портов (Мурманск, Архангельск) и цифровизация навигации под управлением «Росатома». Одним из ключевых аспектов повышения интенсивности: развитие СМП как альтернативного кратчайшего маршрута между Евразией и Азиатско-Тихоокеанским регионом [9,10].

Данная тенденция неизбежно сопровождается усилением техногенной нагрузки на хрупкие арктические экосистемы, ключевым компонентом которой выступает подводный шум (ПШ) от трасс движения судов.

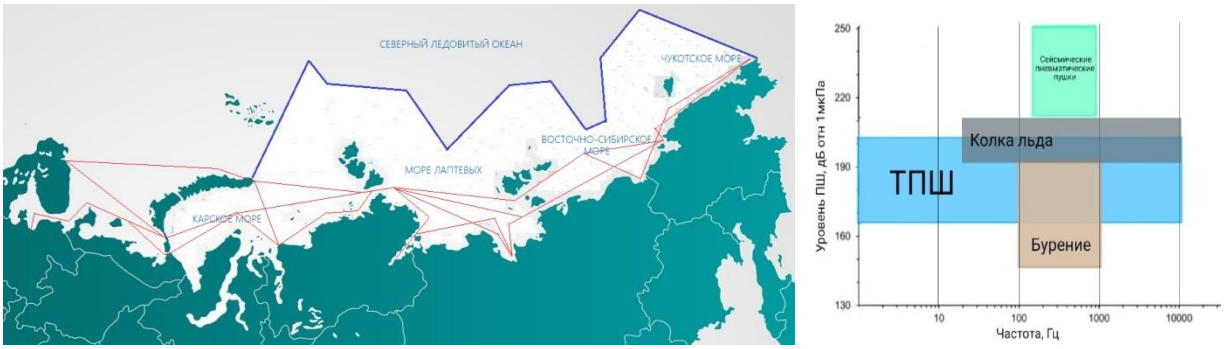


Рисунок 1 – карта СМП с трассами прохождения судоходства и уровнями ПШ

Рост интенсивности судоходства приводит к кумулятивному эффекту повышения уровней шумового загрязнения, что требует организации систематического контроля и мониторинга акустической обстановки на трассах СМП [1].

2. Современное состояние методического обеспечения измерений ПШ

На международном уровне сформирована система рекомендательных и регламентирующих документов в области подводного шума судов. Классификационные общества, в частности DNV (Норвегия), внедрили специальные обозначения (нотации) для судов с пониженным уровнем подводного шума, такие как SILENT, что создает

экономические стимулы для судовладельцев. В рамках международного сотрудничества также широко используются рекомендации ICES (Международного совета по исследованию моря), устанавливающие допустимые уровни шума, ниже которых эффекты избегания судов морской фауной могут быть проигнорированы [2][3].

ИКЕС (ICES-209) *DNV, Silent Class*

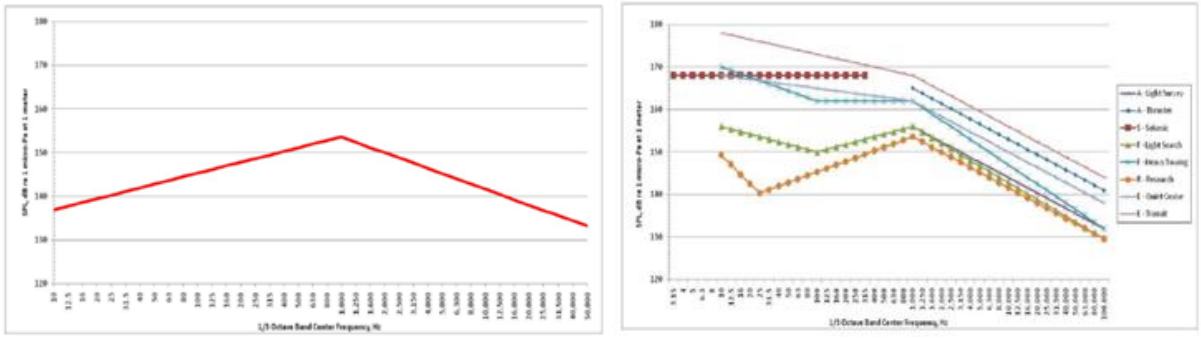


Рисунок 2 – регламентирующие уровни ПШ на международном уровне

В Российской Федерации ситуация характеризуется наличием отдельных научно-методических разработок при отсутствии утвержденной национальной нормативной базы. Специалистами ФГУП «КГНЦ» и представителями СПбГМТУ предложены проекты методик измерения собственного шума судна-носителя и подводного шума объектов гражданской морской техники с использованием гидроакустических комплексов, оснащенных комбинированными приёмниками [4]. Но измерения проводились в натурных условиях с энергообеспечением от самого гражданского судна в стоповом режиме, что невозможно для анализа акустической обстановки под водой во время движения данного судна, и уж тем более в ледовых условиях.

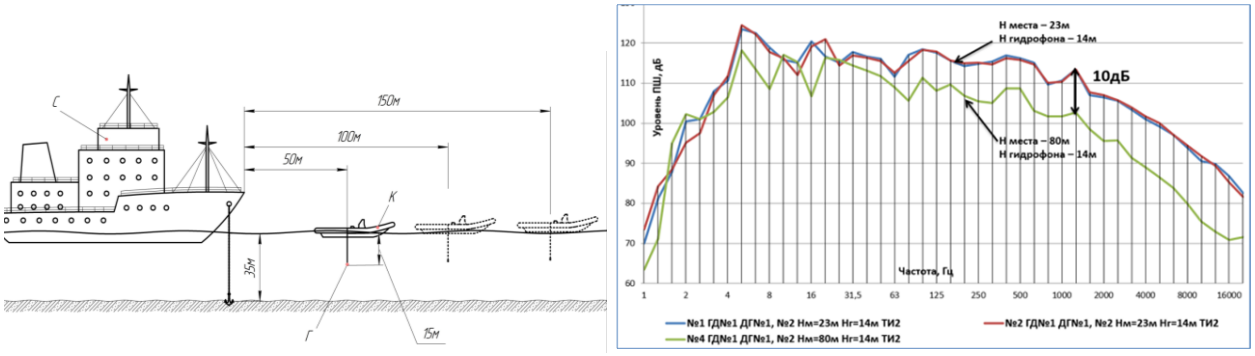


Рисунок 3 – схема измерения подводного шума от судна в стоповом режиме

3. Способы размещения измерительной аппаратуры

Любая методика измерения неразрывно связана с применяемыми средствами измерения, которые должны обеспечивать требуемую точность и прослеживаемость результатов. Современные методики базируются на использовании гидроакустических измерительных комплексов, включающие традиционные ненаправленные гидрофоны.

Традиционный подход к измерению подводного шума трассы судов предполагает его проход над измерительным полигоном, оснащенным донной станцией или подвешенной с судна обеспечения гидроакустической антенной. В этом случае судно следует строго по заданному галсу (курсу) на фиксированном расстоянии от точки регистрации. Такой подход хорошо отработан, но требует наличия специализированного полигона и судна обеспечения.

Альтернативой выступают автономные донные станции, размещаемые на длительный период. Их установка и обслуживание производятся с научно-исследовательских судов. В арктических условиях, характеризующихся наличием ледового покрова, традиционные способы постановки и съёма аппаратуры существенно осложняются, а в зимний период становятся невозможными без использования тяжёлого ледокольного флота. Кроме того, донные станции требуют извлечения для считывания данных, что увеличивает стоимость и трудоёмкость мониторинга.

4. Специфика мониторинга техногенного подводного шума в Арктике. Анализ трассы прохождения судов на СМП

Мониторинг техногенного подводного шума в условиях Арктики сталкивается с рядом специфических вызовов. К ним относятся: мелководность шельфовой зоны, влияющая на условия распространения звука; наличие сезонного ледового покрова, создающего дополнительные шумы и ограничивающего доступ к акватории; сложная гидролого-акустическая обстановка, включающая резкие изменения температуры и солёности по глубине. Разработка системы государственных требований, регламентирующих морскую деятельность в арктических условиях, требует создания технических средств, способных функционировать автономно и передавать данные без необходимости частых экспедиций по их обслуживанию.

На сайте главного мониторинга СМП в России «ГлавСевМорПуть» можно увидеть актуальные карты ледовой обстановки на Карское море, море Лаптевых, Восточно-Сибирское море, Чукотское море. На рисунке 4 показан мониторинг в реальном времени на начало апреля 2026 года. Зелёным цветом обозначен однолетний лёд, который преимущественно занимает практически всю область трасс СМП. В ближайшее время до 2035 года планируется значительный рост объема грузоперевозок в Карском море, связанный с расширением грузовой базы, строительством новых портов, проводимостью дноуглубительных работ, проектированием и освоением новых судоходных маршрутов. Проводимые мероприятия сопровождаются увеличением интенсивности движения транспортных судов в Западном секторе акватории СМП [5].

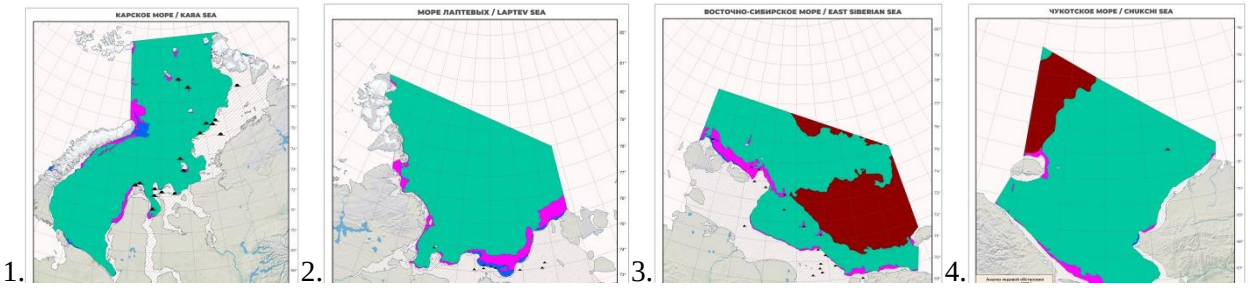


Рисунок 4 – карта ледовой обстановки СМП (1 – Карское море; 2 – море Лаптевых; 3 – Восточно-Сибирское море; 4 – Чукотское море)

5. Перспективное решение мониторинга ТПШ: концепция притопленной буйковой станции со всплывающим радиобуем

Для решения задачи организации долговременного акустического мониторинга в условиях Арктики с однолетним ледовым покровом - предлагается конструкция автономного измерительного комплекса на базе заякоренного притопленного буя-носителя измерительной аппаратуры (рисунок 5). Измерительный буй-носитель связан кабелем с радиобуем, имеющим возможность периодически всплывать для передачи собранной информации [6,7].

Принципиальная схема притопленной автономной буйковой станции (ПАБС) следующая: якорное устройство удерживает аппаратурный буй под водой в заданной точке акватории; измерительная часть (гидрофон с частотным диапазоном с 10 Гц до 100 кГц, и динамическим диапазоном от 100 дБ до 180 дБ относительно 1 мкПа) располагается на глубине, исключающей столкновение с проходящими судами и ледовым покровом; управляющая электроника с минимальным энергопотреблением обеспечивает запись сигналов по заданной программе и хранение данных в течение года.

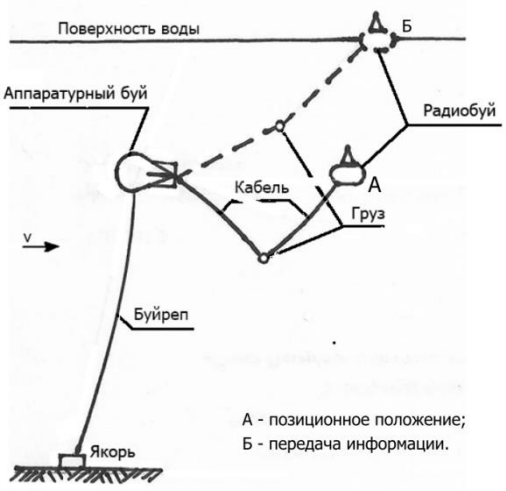


Рисунок 5 – схема ПАБС (А – позиционное положение при записи сигналов; Б – положение всплытия и передачи информации по радиоканалу).

В запрограммированное время или по кодированному гидроакустическому сигналу обеспечивающего судна, радиобуй, связанный кабелем с заякоренным аппаратурным буем,

продувает балластную камеру и всплывает на поверхность воды для передачи по радиоканалу собранной информации. По завершении сеанса связи радиобуй принимает воду в балластную камеру и возвращается в позиционное положение под водой.

Анализируя судоходные трассы на СМП, их глубину, осадку проходящих судов, а также природные факторы, связанные с торошением ледового поля – заглубление до измерительного буя-носителя и радиобуя следует выбрать около 50 м. Кабель-трос от аппаратурного буя до радиобуя имеет длину равной расстоянию их заглубления с запасом на 20-30 метров, учитывающее отклонение по течению.

Такое конструктивное исполнение может обеспечить длительное (до года и более) функционирование комплекса без обслуживания, и возможность эксплуатации в акваториях с сезонным ледовым покровом. Всплытие планируется на безледовый период, что гарантирует сохранность оборудования и успешную передачу данных. Предлагаемое устройство открывает перспективы для создания сети фонового акустического мониторинга на трассах Северного морского пути, сбора данных для верификации методик и последующей разработки национальных природоохранных регламентов [8].

Список литературы

1. Остроумова П.Л. К вопросу о нормировании подводного шума гражданских судов / Сборник трудов АО «ЦНИИМФ». СПб: ООО «ЦИФРОФСЕТ», 2025. − 88 с.
2. Det Norske Veritas (DNV), noise class designation, 2010.
3. Рекомендации ICES Cooperative Research Report No. 209.
4. Пименов И.К. Экспедиция в Баренцево море в рамках Арктического плавучего университета / Сборник трудов «Неделя науки СПбГМТУ – 2024». – Т. 2. – 2024.
5. ФГБУ «ГЛАВСЕВМОРПУТЬ» 2026 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://nsr.rosatom.ru. - Дата обращения: 04.04.2026.
6. Вольфсон Л.М. О некоторых конверсионных работах ЦНИИ «Гидроприбор», связанных с экологией, поиском нефти, подъёмом изделий с морского дна / Записки Горного института. - Т. 176. - 2008.
7. Шехватов Б.И. Океанографические буи и буйковые лаборатории. Проблемы исследования и освоения Мирового океана. Л.: Судостроение, стр.183-203, 1979 г.
8. Руководство по гидрологическим работам в океанах и морях – М.: ГОИН. – 2006.
9. Афонин А.Б. Концепция развития судоходных трасс акватории Северного морского пути / А.Б. Афонин, А.Л. Тезиков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. − 2017.− Т. 9.− № 1.− С. 81–87.
10. АО «ОЦКС Росатома». На Севере плыть [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ocksrosatoma.ru. - Дата обращения: 04.04.2026

УДК: 681.883.45 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39455

Подходы к моделированию гидроакустических сигналов для испытаний средств звукоподводной связи

Скорынин А.А., Крестовских Д.А., Чекмарев М.В., Григас С.Э.

АО «Корпорация «Комета», г. Москва.

E-mail: skoraleks@yandex.ru

Аннотация: В настоящее время из-за растущих требований к дальности, скорости и надежности звукоподводной связи (ЗПС) разработчики вынуждены применять новые сигнально-кодовые конструкции и алгоритмы их обработки. Поскольку их испытания сложно проводить в натурных условиях, всё чаще применяются стендовые испытания с использованием модельных гидроакустических сигналов, воспроизводящие особенности распространения в морских условиях. В данной работе рассмотрены основные виды искажения гидроакустических сигналов связи, которые возникают при их передаче на большие расстояния в морских условиях. Для моделирования этих искажений в стендовых условиях предложено использовать полуэмпирический метод, основанный на результатах измерения характеристик гидроакустических каналов в натурных условиях, и численный метод на основе лучевой теории распространения гидроакустических сигналов. В работе представлены результаты применения указанных методов для испытания средств ЗПС в условиях работы на маневрирующем подводном аппарате в нестационарном многолучевом гидроакустическом канале.

Ключевые слова: звукоподводная связь, моделирование гидроакустических сигналов

Approaches to hydroacoustic signal modeling for testing underwater acoustic communication systems

Skorynin A.A., Krestovskikh D.A., M.V. Chekmarev, Grigas S.E.

JSC «Corporation «Kometa», Moscow.

E-mail: skoraleks@yandex.ru

Abstract: Due to increasing requirements for range, data rate, and reliability of underwater acoustic communication (UAC), developers employ new signal-code structures and their corresponding processing algorithms. Since testing these systems under full-scale field conditions is difficult, bench testing with underwater signal simulation that reproduces the features of propagation in marine environments is used. This paper examines the main types of distortions of UAC signals that occur during long-range transmission in marine environments. To simulate these distortions under bench conditions, the authors propose a semi-empirical

method based on measured characteristics of underwater channels obtained from field experiments and a numerical method based on ray theory of underwater signal propagation. The paper presents the results of applying these methods for testing UAC systems operating on a maneuvering underwater vehicle in a non-stationary multipath underwater acoustic channel.

Keywords: underwater acoustic communication, underwater acoustic signal modeling.

PACS: 43.30.+m

Введение

В настоящее время к средствам звукоподводной связи (ЗПС) предъявляются все более высокие требования по дальности, скорости и надежности передачи информации, что вынуждает разработчиков применять новые виды сигнально-кодовых конструкций и алгоритмы их обработки. Проверка правильности работы средств ЗПС и оценка их достижимых характеристик во всем диапазоне условий применения в ходе натурных испытаний представляет собой очень сложную и дорогостоящую операцию. По этой причине получают распространение стендовые испытаний средств ЗПС, в ходе которых моделируются условия распространения и приема гидроакустических сигналов, приближенные к натурным.

Вследствие пространственной неоднородности морской среды гидроакустические сигналы при распространении испытывают значительные искажения, вызванные многолучевым характером их распространения, что приводит к возникновению частотно-селективных замираний и межсимвольной интерференции. Характеристики указанных искажений меняются со временем вследствие перемещения приемной и передающей позиций, а также нестационарности морской среды на трассе распространения гидроакустических сигналов.

Для моделирования этих особенностей распространения гидроакустических сигналов может применяться полуэмпирический метод, основанный на результатах измерения характеристик гидроакустических каналов в натурных условиях [1, 2], а также численный метод на основе лучевой теории распространения гидроакустических сигналов, предложенный в работе [3] и реализованный в виде программного комплекса для отработки средств ЗПС [4].

1. Полуэмпирический метод моделирования гидроакустических сигналов

Для моделирования распространения гидроакустических сигналов применяется модель линейного канала с постоянными характеристиками. В этой модели сигнал, поступающий на вход приемной аппаратуры, описывается выражением

$$s(t) = \int s_{in}(t-\tau)h(\tau)d\tau, \qquad (1)$$

где h – импульсная характеристика канала (ИХК), s_{in} – сигнал на выходе передатчика.

Данная модель позволяет описать многолучевое распространение сигнала, сопровождающееся замираниями и межсимвольной интерференцией. Однако область ее применения ограничена неподвижными абонентами и «замороженной» средой, характеристики которой не меняются во времени. В реальности гидроакустический канал не является стационарным, поскольку морские течения, сопровождающиеся завихрениями, и внутренние волны вызывают возмущения пространственного распределения температуры и солености воды, а, следовательно, и скорости звука. Из-за этого меняются длины траекторий акустических лучей и соответственно – время прохождения сигналов по ним. Сигнал на входе приемника в нестационарном гидроакустическом канале описывается выражением [1]:

$$s(t) = \int s_{in}(t-\tau)h(t,\tau)d\tau\,, \qquad (2)$$

где $h\,(t,\,\tau)$ – нестационарная импульсная характеристика канала (НИХК, time-varying impulse response – TVIR).

Оценка НИХК может быть получена экспериментальным путем как это было сделано в работе [2], где на основе серии измерений была разработана компьютерная модель WaterMark, позволяющая по формуле (2) рассчитывать сигнал $s(t)$ на входе приемника. Указанная модель, изначально созданная для 5 трасс в районе одного из Гавайских островов, в настоящее время пополнена данными для различных акваторий Мирового океана [2].

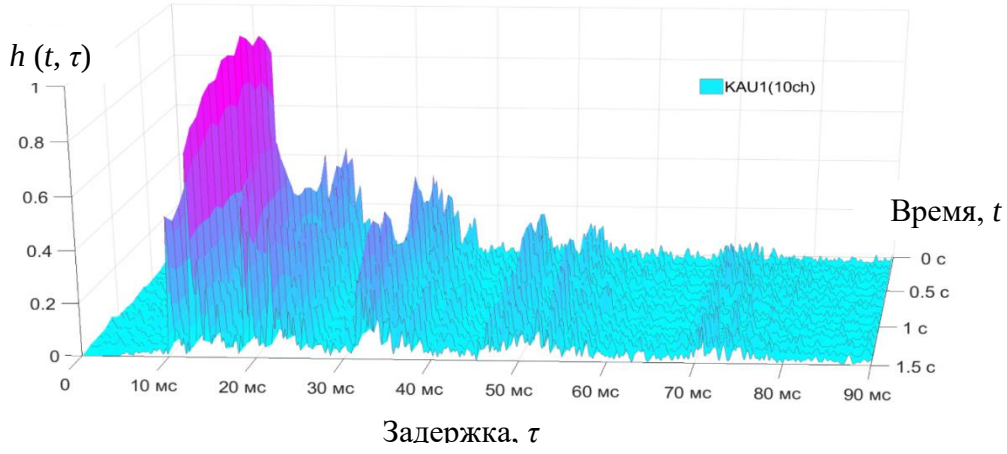


Рис. 1. Эмпирическая оценка НИХК, полученная в эксперименте KAU1.

Достоинствами модели является то, что она адекватно воспроизводит искажения гидроакустических сигналов, включая многолучевость распространения с различным доплеровским уширением спектра отдельных лучей, вызванным волнением морской поверхности, а также изменение количества лучей и их амплитуды во времени (см. рис. 1). Кроме того, она позволяет рассчитывать прохождение различных сигналов ЗПС в абсолютно одних и тех же условиях, что позволяет сравнивать их характеристики и выбирать наиболее адекватные для решаемой задачи.

Основным недостатком данного метода является его ограниченность только теми условиями распространения акустических сигналов, для которых были получены эмпирические оценки НИХК. Так, на момент обращения в библиотеке [2] отсутствовали данные для моделирования распространения сигналов в диапазоне 0.5 - 5 кГц.

2. Метод моделирования гидроакустических сигналов на основе лучевой теории

Указанного выше недостатка лишен подход, в котором моделирование гидроакустических сигналов осуществляется на основе теоретической оценки НИХК. Такая оценка может быть получена в рамках модели лучевой гидроакустики. Так в работе [3] было показано, что при движении передатчика по траектории $\boldsymbol{\rho}_u(t)$ и приемника по траектории $\boldsymbol{\rho}_n(t)$ сигнал на входе последнего может быть рассчитан по формуле

$$s\left(t,\boldsymbol{\rho}_n(t),\boldsymbol{\rho}_u(t)\right)=\sum_{m=1}^{N}\boldsymbol{a}_m\left(\boldsymbol{\rho}_u\left(t-\tau_m(t)\right),\boldsymbol{\rho}_n(t)\right)\times s_{in}\left(t-\tau_m(t)\right), \qquad (3)$$

где $\boldsymbol{a}_m(\boldsymbol{\rho}_n,\boldsymbol{\rho}_u)$ – комплексная амплитуда m-го луча, $\tau_m(t)$ – время распространения сигнала, вышедшего из передатчика в момент времени t, по m-ому лучу, полученное с учетом изменения положения приемника за время распространения сигнала, N – число лучей, соединяющих точку излучения и фазовый центр приемной антенны.

С использованием данного подхода был разработан имитатор распространения гидроакустических сигналов (ИРГС) [4], который на основе данных о характеристиках среды позволяет рассчитать параметры сигнала, поступающего в приемник. При этом воспроизводятся его многолучевое распространение, приводящее к замираниям и межсимвольной интерференции, и доплеровские эффекты, а оценка НИХК качественно согласуется с экспериментальной (рис. 1).

Основными достоинствами данного метода является то, что он позволяет формировать сигналы для всех возможных гидролого-акустических ситуаций и различных траекторий движения абонентов. Его основным недостатком – допущение о морской среде как о неизменной во времени. Это приводит к тому, что в отсутствии перемещения приемника и передатчика гидроакустический канал становится стационарным. По этой причине данный метод подходит для тех случаев, когда нестационарность канала, обусловленная движением абонентов, превосходит нестационарность, обусловленную изменением параметров среды. В таких случая рассчитанные НИХК качественно соответствуют эмпирическим НИХК (рис. 1), что подтверждает адекватность данного метода для задач отработки ЗПС.

3. Моделирование приема гидроакустических сигналов

С использованием предложенного по п. 2 метода была проведена отработка протокола ЗПС, разработанного для доведения команд до подводных аппаратов на большие расстояния. Для снижения негативного влияния помех и многолучевого распространения на вероятностные характеристики приема этих команд в протоколе используется сигнально-кодовая конструкция (СКК), построенная на основе шумоподобных сигналов с большой базой. В целях периодической оценки импульсной характеристики канала в СКК включены синхроимпульсы, чередующиеся с несколькими информационными. Длительность сигнала, содержащего одну команду, составляет около 3 минут.

Для проведения отработки было сформировано 4 сигнала для неподвижного передатчика и различных траекторий движения приемника: 3 прямолинейные траектории с различной скоростью V и ускорением a и одна траектория типа циркуляция – разворот по полукруговой траектории с изменением курса, крена и дифферента. Моделирование осуществлялось для летних условий в Баренцевом море при начальном расстоянии между абонентами 100 км. Моделировалась многоканальная приемная антенна с веером характеристик направленности в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

К рассчитанным сигналам добавлялись реализации белого гауссова шума с различной амплитудой, так чтобы отношение сигнал-шум (ОСШ), оцениваемое как мощность сигнала к мощности шума в полосе частот сигнала, варьировалось в диапазоне от -12 до +4 дБ. Полученные сигналы с шумом подавались на вход программы, реализующей алгоритмы обработки сигнала. По результатам их работы оценивалась вероятность доведения команды как доля сигналов, в которых команда была принята без ошибок. Результаты моделирования представлены на рисунке 2. Также на рисунке представлена теоретическая кривая зависимости вероятности доведения от ОСШ, полученная в приближении многолучевого стационарного канала с импульсной характеристикой для точки начала траекторий движения приемника.

Из представленных данных видно, что реализованные алгоритмы обработки сигналов успешно справляются со слежением за сигналом с переменным доплеровским сдвигом частоты. Незначительное отличие от теоретической оценки показывает, что алгоритмы также успешно борются с нестационарностью канала и возникающими при этом замираниями.

В то же время существенное ухудшение вероятности доведения происходит при движении по сложной траектории. Анализ показывает, что основной вклад в это вносят замирания сигнала и потери, связанные с поиском пространственного канала для обработки, а также с расплыванием отдельного импульса сигнала между несколькими пространственными каналами антенны.

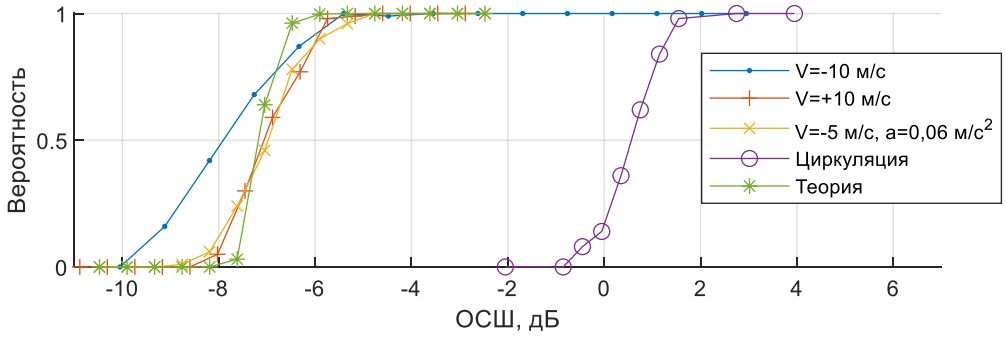


Рис. 2. Результаты приема модельных сигналов.

Заключение

В работе рассмотрена два метода моделирования моделированию гидроакустических сигналов для испытания средств ЗПС в стендовых условиях, воспроизводящие искажения гидроакустических сигналов при распространении: полуэмпирический метод, основанный на результатах измерения характеристик гидроакустических каналов в натурных условиях, и численный метод на основе лучевой теории распространения гидроакустических сигналов. Отмечены их основные достоинства и недостатки.

Представлен пример применения второго метода для отработки протокола ЗПС, позволившие выявить слабые и сильные стороны применяемых алгоритмов обработки.

Список литературы

1. *Van Walree P.A., Socheleau F.-X., Otnes R. and Jenserud T.* Watermark benchmark for underwater acoustic modulation schemes // IEEE Journal of Oceanic Engineering. 2017. **42**. P. 1007–1018.
2. Underwater Acoustic Channel Library. URL:https://uwa-channels.github.io (дата обращения: 25.01.26 г.)
3. *Калюжный А.Я.* Лучевое представление поля эхолокационных сигналов в слоисто-неоднородной среде при сложном движении приемно-излучающих антенных систем // Акустический журнал. 1994. **40**, № 4. С. 599–605.
4. *Скорынин А.А., Григас С.Э.* Моделирование гидроакустических сигналов и помех для отработки средств звукоподводной связи. Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики: труды Всероссийской конференции. СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС. 2024. С.113-115.

УДК 542.34 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39456

Физические проблемы пеленгования в глубоком море

С.П. Аксенов[a], Г.Н. Кузнецов[a, *]

[a] *Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, 119991, Россия*

**E-mail: skbmortex@mail.ru*

Аннотация — Выполнен анализ возможности оценки пеленга на движущийся источник в глубоком море с использованием антенн, ориентированных горизонтально и вертикально. Пеленгование источника промоделировано в ближней и дальней зонах акустической освещенности (БЗАО и ДЗАО), а также в зоне тени (ЗТ). Установлено, что в БЗАО и ДЗАО для получения несмещенных оценок пеленга достаточно использовать среднее значение измеренной скорости звука в воде. Но в ЗТ при летних условиях для пеленгования нужно применять эффективную фазовую или групповую скорости (ЭФС или ЭГС), которые заметно отличаются от скорости звука в воде и зависят от расстояния до источника. Показано, что применение вертикально ориентированной антенны в ЗТ дает возможность вычислять значения ЭФС и ЭГС, которые необходимы для пеленгования источника, а также непрерывно оценивать расстояние. Поэтому в ЗТ для оценки пеленга необходимо совместно применять горизонтальную и вертикальную антенны, тогда как в БЗАО и ДЗАО достаточно точное пеленгование можно выполнять с помощью горизонтальной антенны. В зимних условиях зоны тени нет, и для фазирования горизонтальной антенны можно на всех расстояниях использовать среднюю скорость звука в воде.

Ключевые слова: глубокое море, пеленгование, горизонтальные и вертикальные антенны, эффективные фазовые и групповые скорости, зоны акустической освещенности, зона тени, расстояние до источника.

Physical Problems of Bearing in the Deep Sea

S.P. Aksenov[1], G.N. Kuznetsov[1, a]

[1] *Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow 119991, Russia*

E-mail: [a]skbmortex@mail.ru

Abstract — The analysis of the possibility of estimating the bearing on a moving low-noise source in the deep sea using antennas oriented horizontally and vertically has been performed. The direction finding of the source is modeled in the near-field and far-field zones of acoustic illumination (NFZAI and FFZAI), as well as in the shadow zone (SZ). It has been established that in the NFZAI and FFZAI, to obtain unbiased estimates of the bearing, it is sufficient to use the average value of the measured

speed of sound in water. However, in summer conditions, effective phase or group velocities (EPV or EGV) must be used for bearing, which differ markedly from the speed of sound in water and depend on the distance to the source. It is shown that the use of a vertically oriented antenna in SZ makes it possible to calculate the values of the EPV and EGV, which are necessary for bearing the source, as well as for continuous estimating the distance. Therefore, in the SZ, it is necessary to use horizontal and vertical antennas together to estimate the bearing, whereas in the NFZAI and FFZAI, sufficiently accurate bearing can be performed using a horizontal antenna. In winter conditions, there is no shadow zone, and the average speed of sound in water can be used for phasing a horizontal antenna at all distances.

Keywords: deep sea, direction finding, horizontal and vertical antennas, effective phase and group velocities, acoustic illumination zones, shadow zone, distance to the source.

Введение

Если в волноводе при фазировании горизонтальной антенны пренебрегать отклонением вектора градиента фазы φ комплексной огибающей (КО) звукового давления (ЗД) от горизонтального направления, то возникает систематическая составляющая погрешности $\Delta\hat{\gamma}_{s0}$ оценки пеленга на источник звука. Она зависит [1] от истинного пеленга на источник γ_s и угла θ скольжения градиента фазы φ КО ЗД в вертикальной плоскости,

$$\Delta\hat{\gamma}_{s0} = \left|\hat{\gamma}_{s0} - \gamma_s\right| = \left|\arcsin[\sin\gamma_s \cos\theta] - \gamma_s\right|. \quad (1)$$

Оценку $\hat{\gamma}_s$ пеленга на источник получают по отклику горизонтальной антенны $U(\gamma, r)$,

$$U(\gamma, r) = \sum_{n=1}^{N} A_n(r) e^{i[\varphi_n(r) - (2\pi f/c)\Delta L(n-1)\sin\gamma]}, \quad (2)$$

где $\hat{\gamma}_s$ соответствует максимальному значению отклика $U_{\max}(\gamma, r)$ после сканирования по углу γ в горизонтальной плоскости, а *наличие или отсутствие систематической составляющей погрешности* $\Delta\hat{\gamma}_{s0}$ *оценки пеленга определяется в (2) параметром* c *– скоростью звука, которую выбирают для фазирования горизонтальной антенны*. Другими параметрами в формуле (2) являются r – горизонтальное расстояние между точками излучения и приема сигнала, A_n и φ_n – амплитуда и фаза КО ЗД на n–м приемнике антенны, ΔL – интервал между приемниками, f – частота звуковых колебаний.

Пеленгование источника звука в глубоком море при летних условиях промоделировано в ближней и дальней зонах акустической освещенности (БЗАО и ДЗАО), а также в зоне тени (ЗТ). В БЗАО и ДЗАО для получения несмещенных оценок пеленга достаточно использовать $c = \bar{c}_0$ – среднее значение измеренной скорости звука в воде. Но в ЗТ для пеленгования в качестве c нужно применять эффективную фазовую или групповую скорости (ЭФС или

ЭГС), которые заметно отличаются от скорости звука в воде, особенно в начале ЗТ, и зависят от расстояния до источника. ЭФС $c_{\varphi ef}$ используется для сканирования в горизонтальной плоскости по фазовым задержкам [1], ЭГС c_{gef} – при пеленговании широкополосных сигналов во временной области, по временным задержкам,

$$c_{\varphi ef} = 2\pi f / (\partial\varphi / \partial r),\ c_{gef} = 2\pi r / (\partial\varphi / \partial f), \quad (3)$$

в ЗТ в зоне интерференционных максимумов (ИМА) они имеют лучевую асимптотику [1]

$$c^*_{\varphi ef} = \bar{c}_0 / \cos\theta,\ c^*_{gef} = \bar{c}_0 \cdot \cos\theta,\ \cos\theta \approx 1/\sqrt{1+(a/r)^2},\ (z_s + z)/2 < h/10. \quad (4)$$

Здесь z_s – глубина источника, z – глубина приемника, h – глубина моря, $a = 2h$, если на пути от источника к приемнику луч претерпел одно отражение от дна, и $a = 4h$, если на этом пути луч отразился от дна два раза. В (4) неравенство $(z_s + z)/2 < h/10$ применяется с учетом реальных глубин подвижных источников и приемников в глубоком море.

В начале ЗТ доминируют вытекающие моды и крутые лучи. Здесь отклонение θ вектора градиента фазы КО ЗД от горизонтального направления определяется в ИМА выражением $\theta \approx \pm\arccos[1/\sqrt{1+(2h/r)^2}]$ и при $r = 2h/\sqrt{3}$ составляет $\theta \approx \pm 60^o$. Здесь нужна и вертикальная антенна, так как она дает возможность определить θ, а затем использовать в качестве параметра c значение $c = c^*_{\varphi ef} = \bar{c}_0 / \cos\theta$ (для устранения систематической составляющей погрешности оценки пеленга) и при больших θ определить расстояние r до источника. Выражение для отклика вертикальной антенны аналогично (2), но при сканировании угол γ заменяем на угол θ, а параметр c в (2) принимает значение $c = \bar{c}_0$.

1. Моделирование оценки пеленга в глубоком море при летних условиях.

На рис. 1 показано вертикальное распределение скорости звука (ВРСЗ), спадание

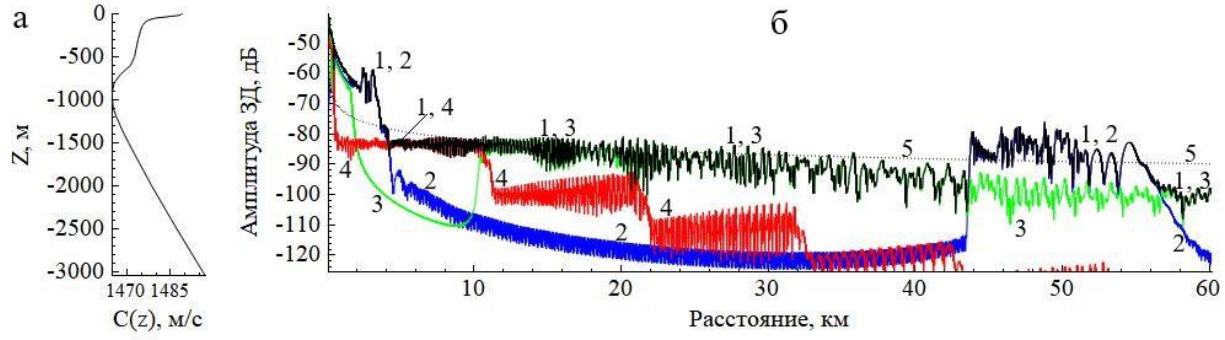


Рис. 1. (а) – ВРСЗ на глубоководном участке Норвежского моря в августе (параметры грунта: скорость звука 1700 м/с, плотность 1.7 г/см^3, потери 2.7 дБ/λ); (б) – амплитуда звукового давления (1), водные моды (2), захваченные моды (3), вытекающие моды (4), цилиндрическое спадание (5); f =2300 Гц, z_s =150 м, z =100 м.

амплитуды ЗД на глубоководном (h=3.048 км) участке Норвежского моря с расстоянием и вклады трех типов мод в амплитуду. В БЗАО (r <4 км) и ДЗАО (44< r <56 км) доминируют

водные моды, в ЗТ – вытекающие ($4 < r < 10$ км) и захваченные ($10 < r < 44$ км) моды.На рис. 2 показаны амплитуда максимального отклика горизонтальной антенны, цилиндрическое спадание уровня сигнала, истинный пеленг на источник и погрешность его оценки. Кривая (4) – погрешность оценки пеленга при $c = \bar{c}_0$, (5) и (6) – систематическая составляющая этой погрешности для луча, отраженного от дна 1 или 2 раза, (7) – погрешность оценки пеленга при $c = c^*_{\varphi eff}(r)$. Параметры горизонтальной антенны: апертура L=30 м, N =101, ΔL =0.3 м. Вариант $c = c^*_{\varphi ef}(r)$ получен с помощью вертикальной антенны с параметрами L=10 м, N =34, ΔL =0.3 м и дает наименьшую погрешность оценки пеленга.

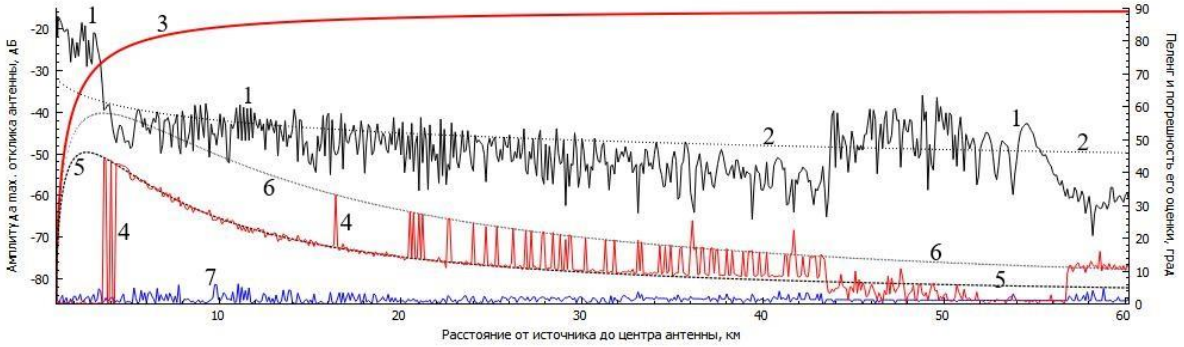


Рис. 2. (1) - амплитуда максимального отклика $U_{\max}(\gamma, r)$ горизонтальной антенны; (2) - цилиндрическое спадание уровня сигнала; (3) - истинный пеленг γ_s на источник; (4) - погрешность $|\hat{\gamma}_s - \gamma_s|$ оценки пеленга при $c = \bar{c}_0$; (5, 6) - систематическая составляющая погрешности $\Delta\hat{\gamma}_{s0}$ при $c = \bar{c}_0$ для луча, претерпевшего одно или два отражения от дна; (7) - погрешность оценки пеленга при $c = c^*_{\varphi ef}(r)$. Норвежское море, август. f =2300 Гц, z_s =150 м, z =100 м, L =30 м, N =101, ΔL =0.3 м (0.47 λ).

Вывод: для получения несмещенной оценки пеленга на источник в глубоком море при летних условиях необходимо одновременное использование антенн, ориентированных горизонтально и вертикально.

2. Амплитудно-фазовые характеристики ЗД в глубоком море при летних условиях.

Ниже показаны фрагменты распределения амплитуды и фазы КО ЗД в вертикальном сечении звукового поля на частоте 200 Гц: в БЗАО (рис. 3), в ДЗАО (рис. 4) и в ЗТ (рис. 5).
В БЗАО основной вклад в ЗД вносят водные моды, эквивалентные двум лучам: прямому и отраженному от свободной поверхности моря. Это – зона ллойдовской интерференции [3], где распределение амплитуды в вертикальной плоскости $r \sim z$, как видно на рис. 3, имеет веерный характер, а градиент фазы направлен вдоль гребней амплитуды.

В ДЗАО основной вклад в ЗД вносят водные моды, их бриллюэновские лучи имеют малые углы скольжения. Гребень амплитуды в ДЗАО (рис. 4а) почти горизонтален, линии равной фазы КО ЗД на гребне амплитуды (рис. 4б) почти вертикальны, градиент фазы КО ЗД на гребне амплитуды направлен вдоль гребня, то есть почти горизонтально.

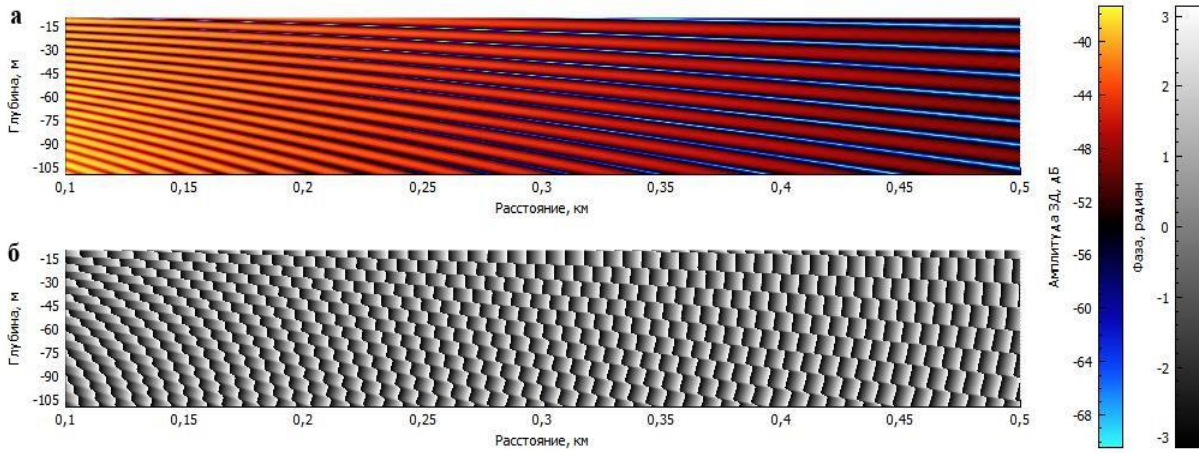


Рис. 3. Распределение амплитуды (а) и фазы (б) ЗД на плоскости $r \sim z$ в БЗАО, где доминируют два луча: прямой и отраженный от свободной поверхности моря. Линии равной фазы перпендикулярны к гребням амплитуды, а градиент фазы направлен вдоль гребней амплитуды (на малых глубинах – почти горизонтально). f = 200 Гц, r =0.1-0.5 км, z_s =133 м, z =10-110 м, Норвежское море, август.

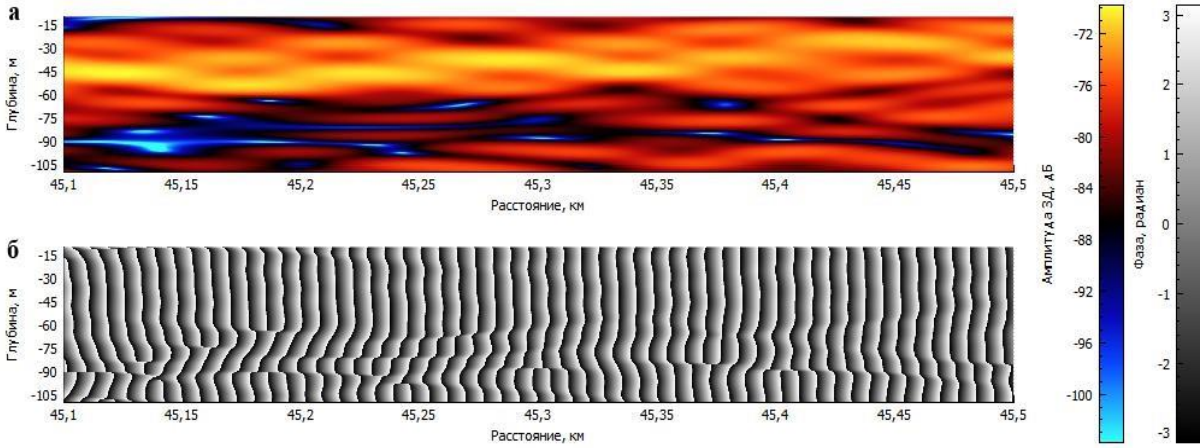


Рис. 4. Распределение амплитуды (а) и фазы (б) ЗД на плоскости $r \sim z$ в ДЗАО, где доминируют водные моды. Линии равной фазы идут поперек гребня амплитуды ЗД, градиент фазы направлен вдоль гребня амплитуды ЗД, то есть почти горизонтально. f = 200 Гц, r =45.1-45.5 км, z_s =133 м, z =10-110 м, Норвежское море, август.

В ЗТ большой наклон градиента фазы КО ЗД ($\pm 38^o$, рис. 5б) обусловлен тем, что в

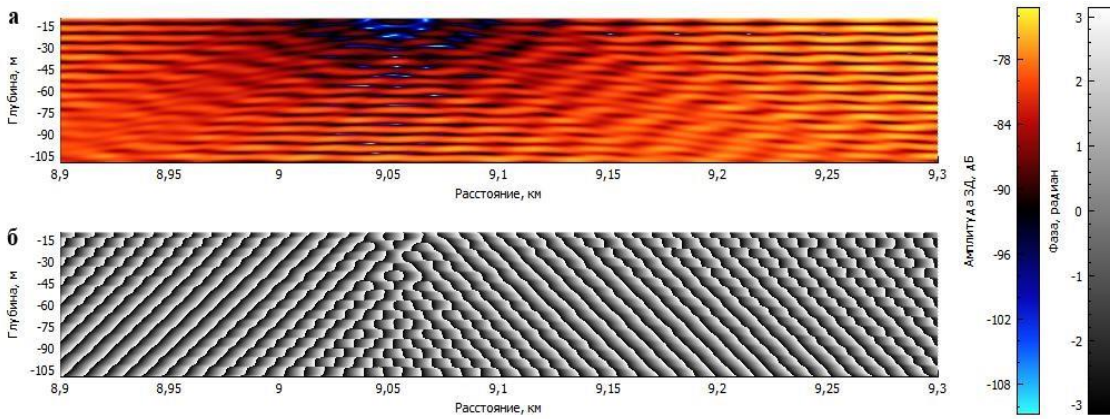


Рис. 5. Распределение амплитуды (а) и фазы (б) ЗД на плоскости $r \sim z$ в зоне тени, где доминируют вытекающие моды. Линии равной фазы идут под наклоном, градиент фазы перпендикулярен к ним. Большой угол скольжения градиента фазы (±38º) на участке r<9.05 км определяется направлением прихода лучей, отраженных от дна и поверхности, а на участке $r >$ 9.05 км - направлением прихода лучей, отраженных от дна. f = 200 Гц, r =8.9-9.3 км, z_s =133 м, z =10-110 м, Норвежское море, август.

начале ЗТ доминируют вытекающие моды с большими углами скольжения бриллюэновских лучей, отраженных от дна 1 раз. При этом по наклону градиента фазы видно, что на первом участке рис. 5б основной сигнал приходит от свободной поверхности моря (под углом, но сверху вниз), а на втором участке рис. 5б – от дна (под тем же углом, но снизу вверх).

В зимних условиях зоны тени нет, и для фазирования горизонтальной антенны на всех расстояниях до источника можно использовать среднюю скорость звука в воде.

Выводы

Выполнен анализ возможности оценки пеленга на широкополосный источник в глубоком море при летних условиях с использованием многоканальных пространственно-развитых антенн, ориентированных горизонтально и вертикально. Пеленгование источника промоделировано в ближней и дальней зонах акустической освещенности (БЗАО и ДЗАО), а также в зоне тени (ЗТ). Установлено, что в БЗАО и ДЗАО для получения несмещенных оценок пеленга достаточно использовать среднее значение измеренной на апертуре антенны скорости звука в воде. Но в ЗТ при летних условиях для пеленгования нужно применять эффективную фазовую или групповую скорости (ЭФС или ЭГС), которые заметно отличаются от скорости звука в воде и зависят от расстояния до источника. Показано, что применение вертикально ориентированной антенны в ЗТ дает возможность непрерывно оценивать расстояние, а также вычислять значения ЭФС и ЭГС, которые необходимы для пеленгования источника. Поэтому в ЗТ для оценки пеленга необходимо совместно применять горизонтальную и вертикальную антенны, тогда как в БЗАО и ДЗАО достаточно точное пеленгование можно выполнять с помощью только горизонтальной антенны. В зимних условиях формируется приповерхностный (термический) канал распространения и зона тени практически не наблюдается. И для фазирования горизонтальной антенны можно на всех расстояниях до источника использовать среднюю скорость звука в воде.

Список литературы

1. *Aksenov S.P., Kuznetsov G.N.* Physical Problems of Direction Finding in the Deep Sea // Phys. Wave Phenom. 2023. Vol. 31. No. 6. P. 383–395.
2. *Аксенов С.П., Кузнецов Г.Н.* Интерференционные инварианты в максимумах гидроакустического поля в глубоком море // Акуст. журн. 2024. 70, 1, с. 65. DOI: 10.31857/S0320791924010099.
3. *Урик Р.Дж.* Основы гидроакустики. Л.: Судостроение, 1978. 445 с.

УДК: 534.34; 534.231.1 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39457

Инвариант чупрова в векторно-скалярных полях мультипольных источников в мелком море

Г.Н. Кузнецов[1], А.Н. Степанов[1,2]

[1] Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, 119991, Россия

[2] Самарский национальный исследовательский университет им. С.П. Королева, Самара, 443086, Россия

E-mail: [a]skbmortex@mail.ru

Аннотация: Рассмотрены скалярные и векторные поля, образованные в волноводе Пекериса мультипольными источниками. Получены соотношения, позволяющие рассчитать значения инварианта Чупрова (ИЧ) при различных условиях распространения и различных глубинах расположения источников и приёмников. В результате можно прогнозировать значения ИЧ при вариации гидрофизических условий в волноводе и геометрии эксперимента. Показано, что направленность источников в горизонтальной плоскости практически не влияет на свойства ИЧ, а направленность в вертикальной плоскости приводит к смещению веерной структуры полей амплитуд сигналов. Аналогичным образом изменяются свойства веерной структуры при использовании вертикальных проекций вектора колебательной скорости. Значения ИЧ близки к (+1) на всех частотах и расстояниях, кроме тех, на которых возникают новые моды или дислокации. На этих частотах и в этих зонах возникают знакопеременные выбросы с различными знаками и величинами. Устойчивость ИЧ позволяет применять алгоритмы обработки, разработанные для скалярных полей и ненаправленных источников, к векторно-скалярным полям, сформированным с использованием направленных мультиполей.

Ключевые слова: волновод Пекериса, инвариант Чупрова, векторно-скалярные поля, мультипольные источники, устойчивость ИЧ к направленности источников и приемников.

CHUPROV INVARIANT FOR VECTOR–SCALAR FIELDS OF MULTIPOLE SOURCES IN SHALLOW WATER

G. N. Kuznetsov [1,a] and A. N. Stepanov[1,2]

[1] *Prokhorov General Physics Institute, RAS, Moscow, 199991, Russia*

[2] *Samara University, Samara, Samara, 443086, Russia*

E-mail: [a]skbmortex@mail.ru

Abstract: Scalar and vector fields generated by multipole sources in a Pekeris waveguide are considered. Relationships are derived for calculating the Chuprov invariant (CI) values under

various propagation conditions and at different source and receiver depths. This allows one to predict the CI values under varying hydrophysical conditions in the waveguide and experimental geometry. It is shown that the source directivity in the horizontal plane has virtually no effect on the CI properties, while directivity in the vertical plane leads to a shift in the fan-shaped structure of the signal amplitude fields. The properties of the fan-shaped structure change similarly when using vertical projections of the oscillatory velocity vector. The CI values are close to (+1) at all frequencies and distances, except for those at which new modes or dislocations arise. At these frequencies and in these zones, alternating-sign spikes with different signs and magnitudes arise. The stability of the IF allows the application of processing algorithms developed for scalar fields and non-directional sources to vector-scalar fields formed using directional multipoles.

Keywords: Pekeris' waveguide, Chuprop's invariant, vector-scalar fields, multipole sources, IC resistance to directional properties of sources and to the vector structure of signal fields

Введение

В акустике мелкого моря находит широкое применение интерференционный (волноводный) инвариант С.Д. Чупрова [1]. С его помощью решают различные задачи гидроакустики, в том числе задачи обнаружения, дальнометрии, навигации и некоторые другие. Главным достоинством методов, основанных на применении интерференционного инварианта Чупрова (ИЧ), считают отсутствие необходимости использовать достаточно сложную волновую модель передаточной функции волновода, построенную с учетом достоверной информации о глубине волновода, характеристиках грунта, распределения скорости звука в водном слое и т.д. Обычно такие задачи решаются применительно к ненаправленным источникам и к полю ЗД, хотя известно, что шумовые поля реальных объектов обладают направленностью, как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости, а во многих практически важных случаях необходимо ещё и знание векторного поля колебательной скорости (ВКС). В связи с этим изучение свойств ИЧ и вариантов его применения для векторно-скалярных полей и направленных излучателей представляется актуальной задачей.

2. Линии гребней в векторно-скалярных полях мультиполей

Известно, что для любых волноводов и монохроматических ненаправленных точечных излучателей для достаточно больших расстояний, когда функции Ханкеля можно заменить их асимптотическими представлениями, выражение для звукового давления P может быть представлено в виде модового разложения:

$$P(\omega,r,t,z_0,z) = |P(\omega,r,t,z_0,z)|\, e^{i\varphi(\omega,r,t,z_0,z)} = \sum_{l=1}^{N} p_l(\omega,r,t,z_0,z)\exp\left(i\varphi_l(\omega,r,t,z_0,z)\right), \quad (1)$$

где $|P(\omega, r, t, z_0, z)|$ и $\varphi(\omega, r, t, z_0, z)$— амплитуда и фаза звукового давления источника, зависящие от круговой частоты ω, горизонтального расстояния *r*, времени *t*, а также глубин источника z_0 и приемника z, *N* — количество мод, p_l — коэффициент возбуждения и φ_l – фаза *l*-й моды. Будем считать аргументами рассматриваемых функций частоту ω и расстояние *r*, а время *t* и глубины z_0 и z— параметрами, и в дальнейшем изложении опускать параметры в обозначениях функций.

Для построения линий, определяющих в волноводе Пекериса положение гребней — зон локализации максимумов амплитуд ЗД в пространстве, частота–расстояние, в первом приближении можно считать, что значение производной от модуля амплитуды давления по направлению гребня равно нулю. Приравнивая к нулю полный дифференциал модуля давления $d|P(\omega, r)| = 0$, получим уравнение линий гребней в виде:

$$\frac{dr}{d\omega} = -\frac{\partial |P(\omega, r)|}{\partial \omega} \Big/ \frac{\partial |P(\omega, r)|}{\partial r} \tag{2}$$

Будем рассматривать частотную область, в пределах которой изменение количества нормальных волн *N* не велико и/или вкладом от такого изменения можно пренебречь. Получим:

$$\frac{dr}{d\omega} = \beta \frac{r}{\omega}, \tag{3}$$

где $\beta = 2\dfrac{\sum_{l=1}^{N} p_l \left(q_l - r\omega g_l \dfrac{\partial k_l}{\partial \omega} \right)}{\sum_{l=1}^{N} p_l (q_l + 2r g_l k_l)}$, $k_l = \dfrac{\omega}{c_l}$, $q_l = \sum_{m=1}^{N} p_m \cos(\varphi_l - \varphi_m)$, $g_l = \sum_{m=1}^{N} p_m \sin(\varphi_l - \varphi_m)$.

Параметр β в уравнении (3) по своему физическому и геометрическому смысл совпадает с известным из [1] инвариантом Чупрова. Полученные соотношения позволяют на основании известного модового представления поля ЗД монопольного источника рассчитать инвариант β, а затем определить положение любой из линий гребней ЗД. Описанный подход легко расширяется на поля ЗД и ВКС различных мультипольных источников. Для получения искомых соотношений воспользуемся приведенными в [2] выражениями для ЗД и компонент ВКС точечного мультипольного источника в волноводе Пекериса толщиной h :

$$P(\omega, r) = i\omega\rho_0 \sum_{n=0}^{L} \sum_{m=-n}^{n} C_{nm} \sum_{l=1}^{N} A_{nml} H_m^{(1)}(k_l r), \; V_z(\omega, r) = \sum_{n=0}^{L} \sum_{m=-n}^{n} C_{nm} \sum_{l=1}^{N} A'_{nml} H_m^{(1)}(k_l r),$$

$$V_r(\omega, r) = \sum_{n=0}^{L} \sum_{m=-n}^{n} C_{nm} \sum_{l=1}^{N} A_{nml} k_l \left(m H_m^{(1)}(k_l r) / (k_l r) - H_{m+1}^{(1)}(k_l r) \right) \tag{4}$$

В (4) обозначено: L — порядок мультипольности источника, C_{nm} — его мультипольные моменты, $A_{nml} = 2\pi\mu_{nm}\sin\alpha_{l0}\sin\alpha_l P_n^{|m|}(x_l/kh)/kh$, $\chi_{nm} = (-1)^{n+|m|}$, $\mathrm{m}_{nm} = 1$ для $\mathrm{c}_{nm} = +1$ и $\mathrm{m}_{nm} = i$ для $\mathrm{c}_{nm} = -1$, $A'_{nml} = ix_l \operatorname{ctg}\alpha_l A_{nml}/h$, $\alpha_{l0} = \pi(1-\chi_{nm})/4 + x_l z_0/h$, $\alpha_l = x_l z/h$, $P_n^{|m|}$ — присоединенные полиномы Лежандра, $H_m^{(1)}$ — функция Ханкеля порядка *m*.

Если выполнить для выражений (4) преобразования, аналогичные (2)–(3), то получим выражение для инварианта β_V, описывающего положение гребней для полей горизонтальной и вертикальной проекций ВКС , создаваемых мультипольными источниками

$$\beta_V = 2\frac{-r\omega\sum_{l=1}^{N} p_l g_l \frac{\partial k_l}{\partial\omega}}{\sum_{l=1}^{N} p_l\left(q_l + 2rg_l k_l\right)}. \qquad (5)$$

Видно, что инвариант β_V (5) входит в дифференциальное уравнение (3) в ином виде, чем «классический» ИЧ. Причина — компоненты ВКС в отличие от выражения для ЗД напрямую не зависят от частоты. Но дальше путем численного моделирования можно показать, что волноводный инвариант ИЧ для проекций ВКС мультиполей имеет положительные значения (+1), как и для скалярного поля давления монополя. При этом наклоны гребней на плоскости «расстояние-частота», определяемые значением характерных инвариантов, близки по направлениям (наклону), но смещены по координатам.

2. Численное исследование значений инварианта Чупрова в векторно-скалярных полях мультипольных излучателей

Для иллюстрации применимости полученных соотношений выполнен вычислительный эксперимент, в котором анализировались векторно-скалярные поля мультипольных излучателей в волноводе Пекериса со следующими характеристиками: скорость звука в воде c_0=1500 м/с, толщина волновода h=200 м, отношение плотностей воды и грунта 1.7, отношение скоростей звука в воде и в грунте 0.88, коэффициент поглощения границы 0.01.

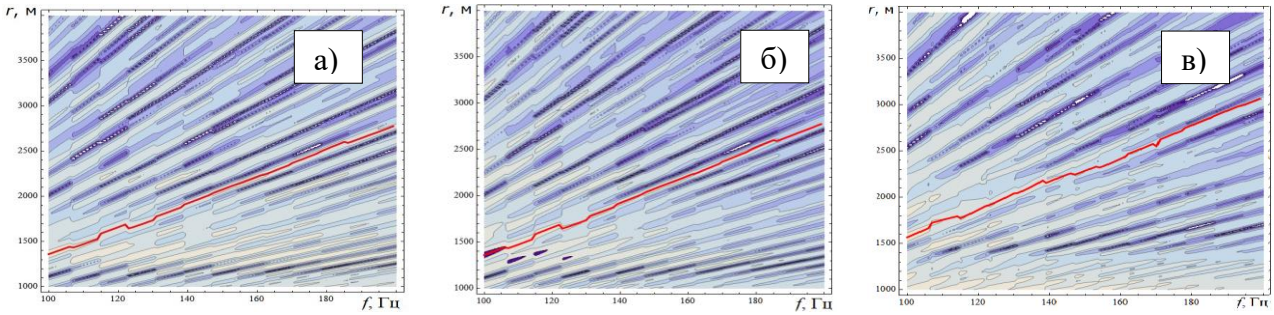


Рис. 1. Контурные графики поверхностей и линии гребней ЗД (**а**), горизонтальной (**б**) и вертикальной (**в**) компонент ВКС, возбуждаемых монополем. Красные линии рассчитаны по дифференциальному уравнению

Расчеты произведены для мелкого моря и двух глубин размещения источников z_0 = 7 м или 100 м, а прием осуществлялся в придонной области на глубине $z = 199$ м. Поле

анализировалось в пространственно-частотной области с диапазоном расстояний от 1200 м до 4000 м с шагом 1 м и в диапазоне частот от 100 Гц до 200 Гц с шагом 1 Гц.

Для анализа результатов численных экспериментов на рис. 1 представлены контурные графики интерференционных поверхностей ЗД (а), горизонтальной (б) и вертикальной (в) компонент ВКС монопольного излучателя, которые совмещены с рассчитанными по соответствующим формулам линиями одного из гребней. Видно, что результаты расчетов с использованием дифференциального уравнения для гребней практически совпадают с данными численного анализа полной интерференционной поверхности. Причем веерные структуры полей ЗД и горизонтальной составляющей ВКС почти совпадают — в отличие от структуры вертикальной проекции ВКС, имеющей близкий по отношению к осям наклон кривых, но смещенный относительно линии гребня для ЗД. Это же свойство полей ЗД и компонент ВКС наблюдается у всех типов квадруполей: структура поверхности вертикальной компоненты ВКС всегда отличается от практически совпадающих структур звукового давления и горизонтальной компоненты ВКС.

На рис. 2 приведены сечения веерной структуры сигнала в пространственно-частотной области для полей ЗД и проекций ВКС для вертикального диполя, рассчитанные для различных частот. Аналогичные расчеты выполнены и для других типов мультиполей, из которых следует, что линии фактических и теоретических гребней, рассчитанные для ЗД и ВКС у всех типов мультиполей достаточно близки, а для ЗД и горизонтальной проекции ВКС монополя и горизонтального диполя — практически совпадают.

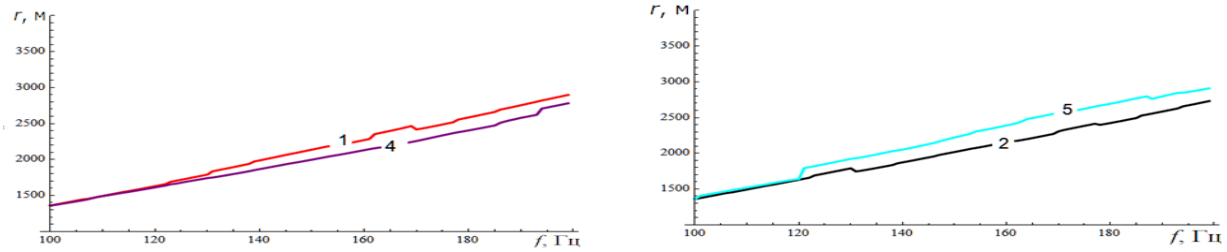


Рис. 2. Линии фактических (1), (2) и теоретических гребней (4), (5) давления (1), (4) и горизонтальной компоненты (2), (5) вертикального диполя, расположенного на глубине 100 м. Изломы наблюдаются при увеличении числа мод.

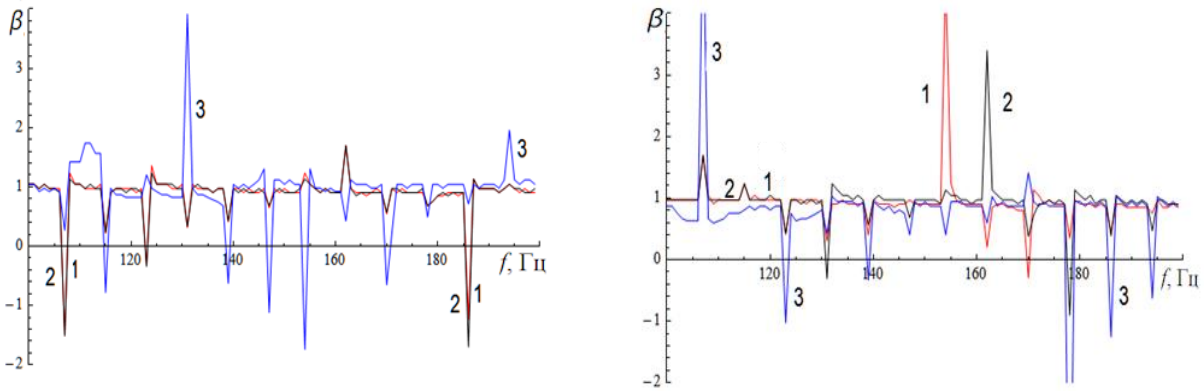


Рис. 3. Зависимости ИЧ от частоты для фактической линии гребня ЗД поля монополя (слева) и вертикального диполя (справа). Глубина 7 м. Кривые 1 и 2 соответствуют ЗД и горизонтальной проекции ВКС, кривая 3 – вертикальной проекции

На рис. 3 сравниваются результаты теоретических расчетов ИЧ, найденных при решении полученных дифференциальных уравнений, с фактическими значениями, найденными исходя из положения линий гребней, которые рассчитаны для тех же начальных условий при расчете всей поверхности. Видно, что используемые соотношения достаточно точно предсказывают не только значения ИЧ, но даже места расположения зон дислокаций.

Выводы

Веерные пространственно-частотные структуры как скалярных, так и векторных полей, возбужденных в волноводе Пекериса направленными источниками, слабо зависят от направленности источников и определяются преимущественно свойствами волновода и глубинами расположения источников и приемников. Заметные отличия наблюдаются для вертикальных проекций ВКС, а также для источников с вертикальной ориентацией диполей и квадруполей, у которых зоны каждого гребня и веерная структура целиком смещаются относительно аналогичных структур для ЗД или горизонтальных проекций ВКС — при практически совпадающих углах наклона (соответственно, и значений ИЧ) на плоскости частота-расстояние. Это позволяет использовать алгоритмы, разработанные для обнаружения и пеленгования ненаправленных источников, для обработки сигналов от реальных крупномасштабных объектов, обладающих направленностью звукового поля как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскости. Аналитические соотношения для вычисления ИЧ применительно к скалярным или векторным полям различаются, но значения ИЧ и, соответственно, наклоны гребней, оказались практически одинаковыми, причем независимо от направленности источника и частоты излучения.

При увеличении расстояния ослабление вертикальных проекций ВКС происходит заметно быстрее, чем горизонтальных проекций и звукового давления. Также точно быстрее уменьшается амплитуда при использовании в качестве источника вертикальных диполей или квадруполей.

Инвариант Чупрова в волноводе Пекириса сохраняет инвариантные свойства и близок по величине к (+1) как для скалярных, так и для векторных составляющих звукового поля. Существенные и непредсказуемые отклонения от инвариантности наблюдаются в зонах интерференционных минимумов (зонах «дислокаций»). В этих зонах наблюдаются резкие и непредсказуемые по величине и направлению отклонения от (+1).

Список литературы

1. *Чупров С.Д.* Акустика океана: современное состояние. М.: Наука, 1982. С. 71–91.
2. *Кузнецов Г.Н., Степанов А.Н.* Векторно-скалярные поля мультипольных гидроакустических источников, эквивалентных шумоизлучению морских объектов. М.: Буки-Веди, 2022. 304 с.

УДК 542.34; 534.34; 534.231.1 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39458

Фазовый инвариант и линии равных фаз в звуковом поле глубокого моря

С.П. Аксенов[1], Г.Н. Кузнецов[1,a], А.Н. Степанов[2]

[1]Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, 119991, Россия
[2]Самарский национальный исследовательский университет им. С.П. Королева, , Самара, 443086, Россия
E-mail: [a]skbmortex@mail.ru

Аннотация: Исследуются пространственно-частотные характеристики звукового давления (ЗД), в том числе – водные, вытекающие и захваченные моды. Показано, что в глубоком море существуют устойчивые линии равных фаз (ЛРФ), вдоль которых при определенных условиях возможно когерентное суммирование комплексных Фурье-компонент. Для описания ЛРФ получено дифференциальное уравнение, использующее в качестве базового параметра устойчивый фазовый инвариант (ФИ). Установлено, что вытекающие моды обладают в глубоком море инвариантными свойствами только на больших расстояниях от источника. Водные и захваченные моды обладают инвариантными свойствами на всех расстояниях.

Ключевые слова: глубокое море, амплитуды и фазы водных, вытекающих и захваченных мод, линии равных фаз, фазовый инвариант, накопление мощности

Lines of equal phases and phase invariant in the sound field of the deep sea

S.P. Aksenov[1], G.N. Kuznetsov[1,a], A.N. Stepanov[2]

[1]A.M. Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991, Russia
[2] Samara National Research University named after academician S.P. Korolev, Samara, 443086, Russia
*E-mail: [a] skbmortex@mail.ru

Abstract: The spatial-frequency characteristics of sound pressure (SP), including water, outflow, and trapped modes, are investigated. It is shown, that in the deep sea, there are stable lines of equal phases (LEP), along which, under certain conditions, coherent summation of complex Fourier components and effective accumulation of signal power are possible. A differential equation is obtained to describe the lines of equal phases, using a stable phase invariant (PI) as a basic parameter. It is shown that the outflow modes exhibit invariant properties only at large distances from the source. Water and captured modes have invariant properties at all distances.

Key words: deep sea, distributions of amplitudes and phases of water, leaky and trapped modes, as well as total sound pressure at different distances and frequencies, equal phase lines, phase invariant, accumulation of signal power.

Введение

Амплитудно-фазовые характеристики звукового поля в волноводе определяются условиями распространения звука, характеристиками излучаемого сигнала и геометрией расположения источников и приемников. Их расчет выполняется с использованием стандартных моделей передаточных функций волновода.

Среди характеристик поля, отличающихся устойчивостью к изменению условий распространения, можно выделить волноводный инвариант Чупрова (ИЧ), который при различных условиях близок к «+1» и в координатах «частота-расстояние» характеризует распределение звуковой интенсивности. Именно поэтому он может быть назван «энергетическим инвариантом» — в отличие от «фазового инварианта» (ФИ), который обнаружен авторами при исследовании «линий равных фаз» в тех же осях, но на фазовой плоскости. Оказалось, что ФИ более устойчив к изменению характеристик сигналов и условий распространения, чем ИЧ, но равен не «+1», а «– 1».

1.Дифференциальное уравнение для описания линий равных фаз

Известно , что для любых волноводов при больших расстояниях, когда функции Ханкеля заменяются их асимптотическими представлениями, выражение для звукового давления (ЗД) можно представить в виде модового разложения *P*:

$$P\left(\omega,r,t,z_0,z\right)=\left|P\left(\omega,r,t,z_0,z\right)\right|e^{i\varphi\left(\omega,r,t,z_0,z\right)}=\sum_{l=0}^{N}p_l\left(\omega,r,t,z_0,z\right)\exp\left(i\varphi_l\left(\omega,r,t,z_0,z\right)\right) \quad (1)$$

где $|P(\omega,r,t,z_0,z)|$ и $\varphi(\omega,r,t,z_0,z)$ — амплитуда и фаза ЗД источника, зависящие от круговой частоты ω, расстояния *r*, времени *t*, глубин источника z_0 и приёмника z, N — количество мод, p_l — амплитуда и φ_l — фаза *l*-й моды, частота ω и расстояние *r* аргументы рассматриваемых функций, а время *t* и глубины z_0 и z — параметры.

Непосредственный численный анализ показал, что коэффициенты p_l разложения (1) по сравнению с фазами φ_l слабо зависят от частоты и расстояния, поэтому производными от p_l по аргументам пренебрегаем. Это позволяет на плоскости частота-расстояние (ω,r) описать ЛРФ дифференциальным уравнением в виде

$$\frac{dr}{d\omega}=-\frac{\sum_{l=0}^{N}\sum_{m=0}^{N}p_l p_m\frac{\partial\varphi_l}{\partial\omega}\cos(\varphi_l-\varphi_m)}{\sum_{l=0}^{N}\sum_{m=0}^{N}p_l p_m\frac{\partial\varphi_l}{\partial r}\cos(\varphi_l-\varphi_m)}=-\frac{\sum_{l=0}^{N}p_l q_l\frac{\partial\varphi_l}{\partial\omega}}{\sum_{l=0}^{N}p_l q_l\frac{\partial\varphi_l}{\partial r}} \quad (2)$$

где $q_l=\sum_{m=0}^{N}p_m\cos(\varphi_l-\varphi_m)$, l=0,1,…,N. Тогда в (2) $\varphi_l(\omega,r)=\omega r/c_{\varphi l}$, и дифференцируя эту функцию по соответствующим аргументам, получаем искомое уравнение:

$$\frac{dr}{d\omega} = \beta_\varphi \frac{r}{\omega}, \qquad \beta_\varphi = -\sum_{l=0}^{N} p_l q_l \frac{\partial k_l}{\partial \omega} / \sum_{l=0}^{N} p_l q_l \frac{1}{c_{\varphi l}} = -\sum_{l=0}^{N} p_l q_l \frac{1}{c_{gl}} / \sum_{l=0}^{N} p_l q_l \frac{1}{c_{\varphi l}}, \qquad (3)$$

где $\varphi_l(\omega, r) = k_l r - \omega t = \omega r / c_{\varphi l} - \omega t$, c_{gl} — групповая скорость, k_l — волновое число и $c_{\varphi l}$ — фазовая скорость *l*-й нормальной волны. Видно, что β_φ в (3) представляет собой параметр дифференциального уравнения, который зависит одновременно от градиентов фазы в частотной и пространственной области и в каждой точке на плоскости (ω, r) определяет касательные к линиям равных фаз (ЛРФ).

2. Амплитудно-фазовые характеристики мод разного типа в различных зонах

Рассмотрим особенности ослабления мод разного типа в глубоком море. Монопольный источник расположен в волноводе (рис. 1) толщиной $h = 2988$ м, в котором ось ПЗК находится на глубине 200 м, скорости звука на поверхности волновода c_0=1542 м/с, на оси ПЗК — 1514 м/с и на дне волновода — 1557 м/с. Плотность грунта выберем равной ρ_1=1.7 г/см^3, коэффициент поглощения — 0.09, и скорость звука в грунте c_L =1700 м/с. Зададим глубины источника и приемника равными $z_0 = 80$ м и $z = 60$ м. Для этих параметров и диапазона частот 300–350 Гц для ВРСЗ, приведенного на рис.1, выполнены 3 группы расчётов: в ближней зоне акустической освещённости (БЗАО) — 1000–2500 м; в зоне тени (ЗТ) — 4 000–30 000 м; и в дальней зоне акустической освещённости (ДЗАО) — 35 000–45 000 м. В каждой группе представлены: суммы водных мод двух типов, только захваченные моды, только вытекающие моды и сумма всех мод. Спадание амплитуды ЗД на частоте f = 330 Гц показано на рис. 2. Видно, что БЗАО заканчивается на расстоянии 2,8 км, зона тени (ЗТ) соответствует 3–33 км, ДЗАО располагается в пределах 34–45 км. На рис. 2 обозначено: 1– сумма всех мод, 2 – сумма групп водных мод, 3 и 4 — вытекающие и захваченные моды, кривая 5 обозначает цилиндрическое спадание.

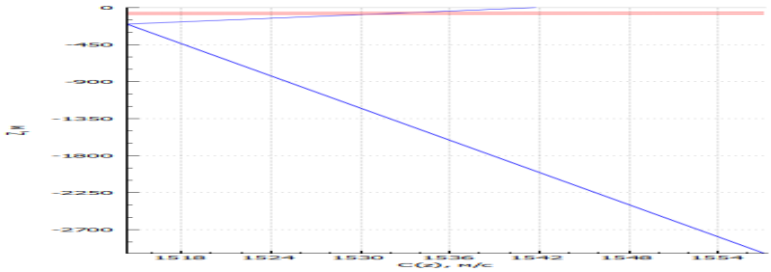


Рис. 1. Принятое в расчётах ВРСЗ (упрощенный вариант ВРСЗ для Средиземного моря).

На рис. 2 выделяются все зоны – БЗАО, ЗТ и ДЗАО. На рисунках 3а, 3д изображены пространственно-частотные распределения амплитуды и фазы ЗД для суммы водных мод. На рис. 3б ,3е; 3в, 3ж; 3г и 3з показаны поверхности амплитуд и фаз для захваченных и вытекающих мод, а также суммарного поля соответственно. Все результаты получены только для первой зоны (БЗАО). Поскольку в БЗАО доминируют водные моды, то должны совпадать

распределения амплитуд и поверхности фаз для структур «все водные моды», а), д) и «все моды», г), з). Видно, что на рис. 3 наблюдаются именно такие результаты. Видно также, что

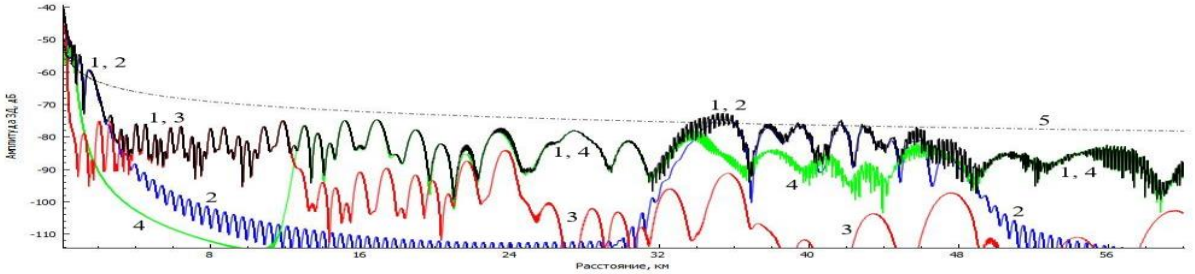


Рис. 2. Ослабление амплитуды ЗД с расстоянием и вклады отдельных групп мод

.

в конце БЗАО (перед зоной тени) проявляется влияние вытекающих мод. Это можно заметить как на поверхности амплитуд, так и на фазовой поверхности. Значения ФИ для всех типов мод — также кроме вытекающих, стабильны и близки к (–1) (рис.4 и рис.5). Утолщённые чёрные линии на этих рисунках представляют одну из линий равных фаз.

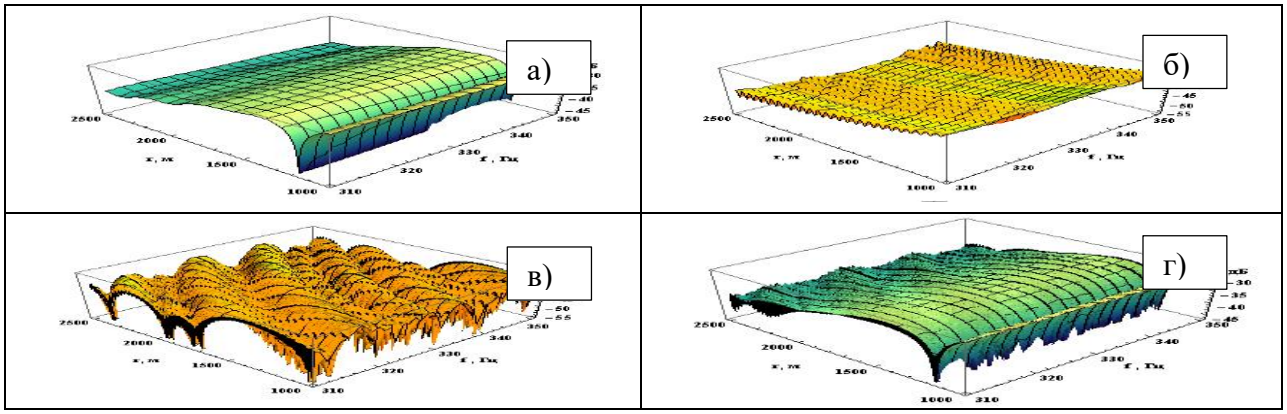


Рис. 3.а-г. Поверхности амплитуд ЗД в БЗАО для различных групп мод (а — все водные моды, б — захваченные моды, в — вытекающие моды, г — сумма всех

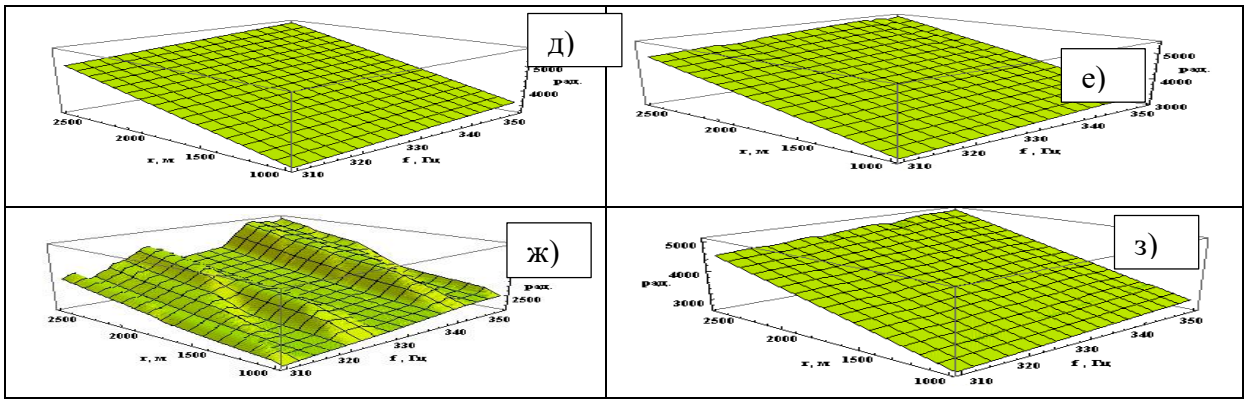


Рис. 3. д-з. Поверхности фаз звукового давления в БЗАО для различных групп мод (д — все водные моды, е — захваченные, ж — вытекающие, з — сумма всех мод).

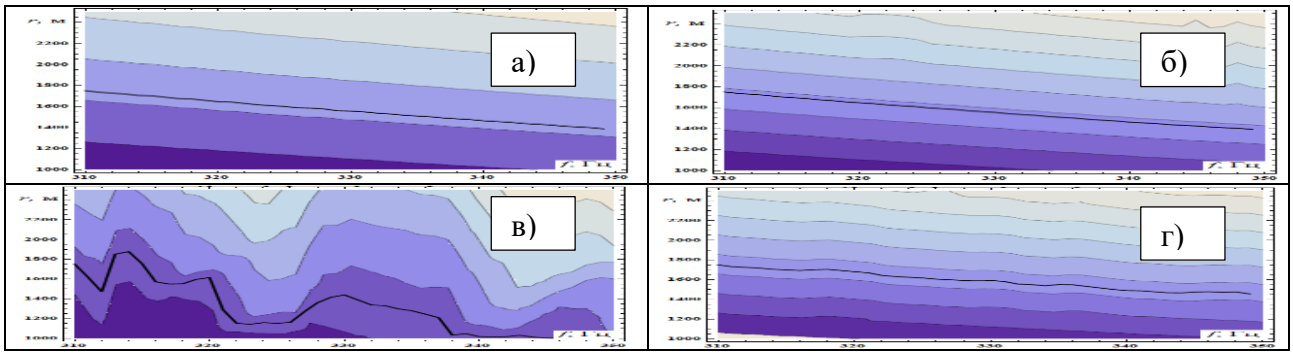


Рис. 4.А. Контурные графики фазовых поверхностей в БЗАО (расстояния 1000–2 500 м) — (а) (б) (в) водные, захваченные и вытекающие моды, (г) сумма всех мод.

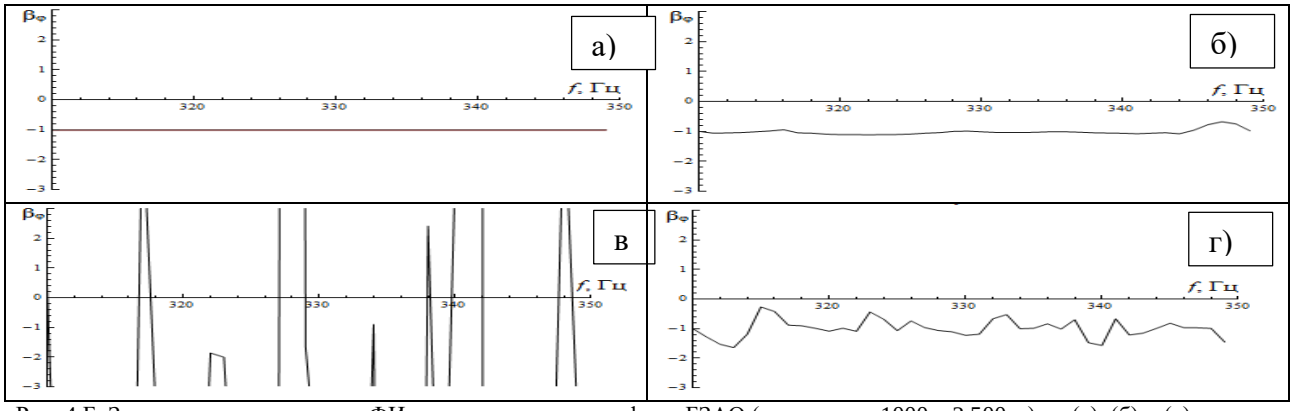


Рис. 4.Б. Зависимости от частоты ФИ вдоль линии равных фаз в БЗАО (расстояния 1000 – 2 500 м) — (а), (б) и (в) водные, захваченные и вытекающие моды, (г) сумма всех мод.

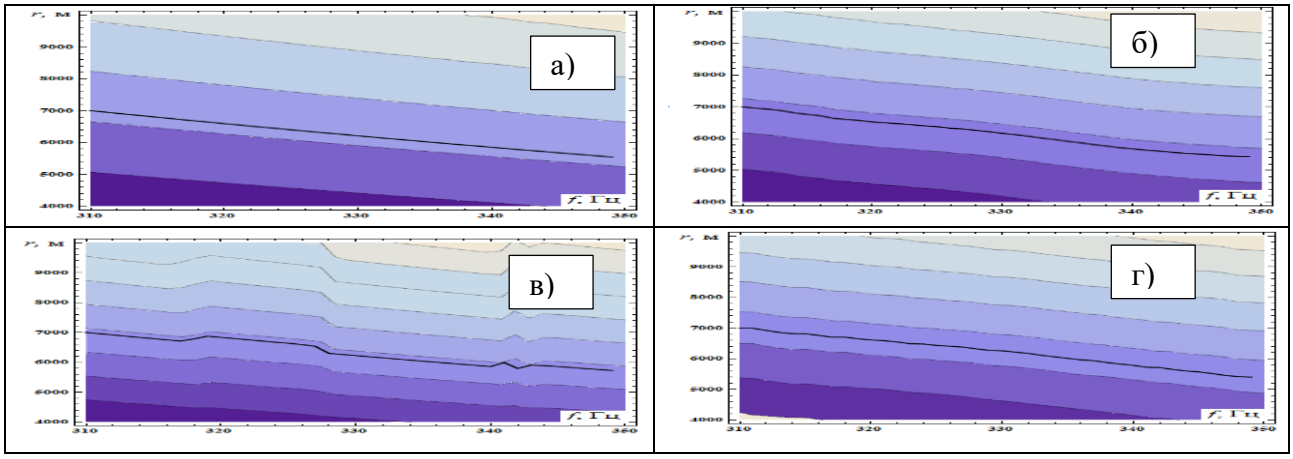


Рис. 5 А. Контурные графики фазовых поверхностей в ЗТ1 (расстояния 4000–10 500 м) — (а) сумма водных мод, (б) захваченные моды, (в) вытекающие моды и (г) сумма всех мод.

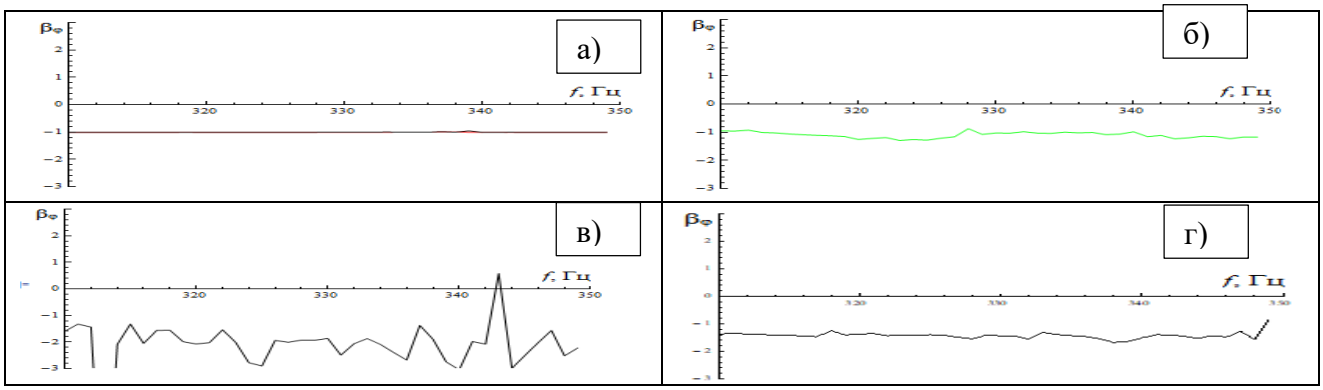


Рис. 5 Б. Зависимости от частоты ФИ вдоль выбранной линии равных фаз в ЗТ1 (4000–10 500 м) — (а), (б) и (в) водные, захваченные и вытекающие моды, (г) сумма всех мод.

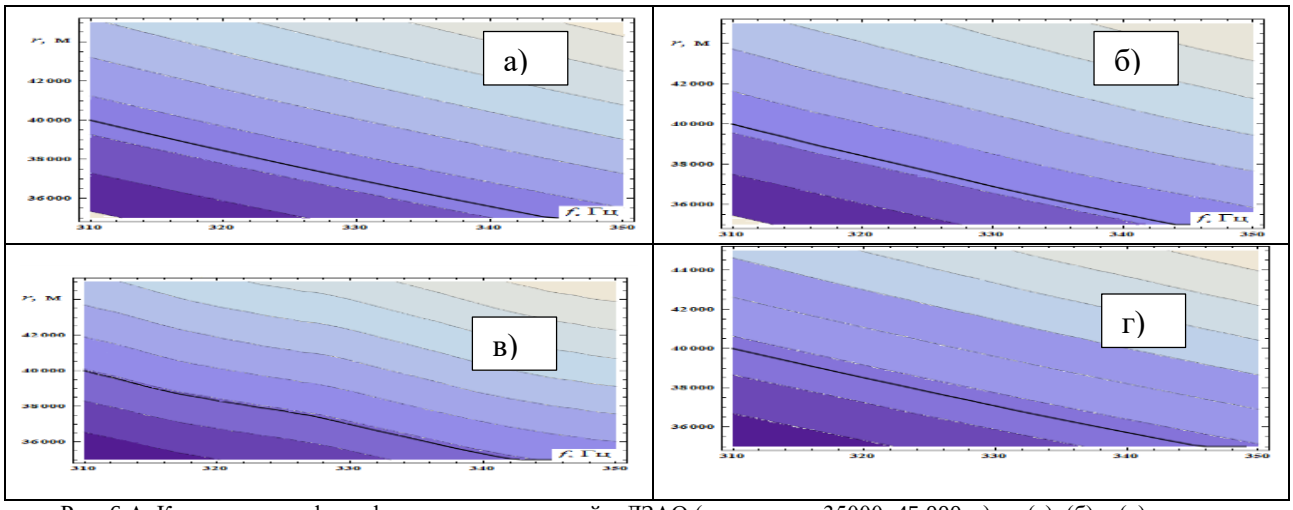


Рис. 6 А. Контурные графики фазовых поверхностей в ДЗАО (расстояния 35000–45 000 м) — (а), (б) и (в) водные, захваченные и вытекающие моды, (г) сумма всех мод.

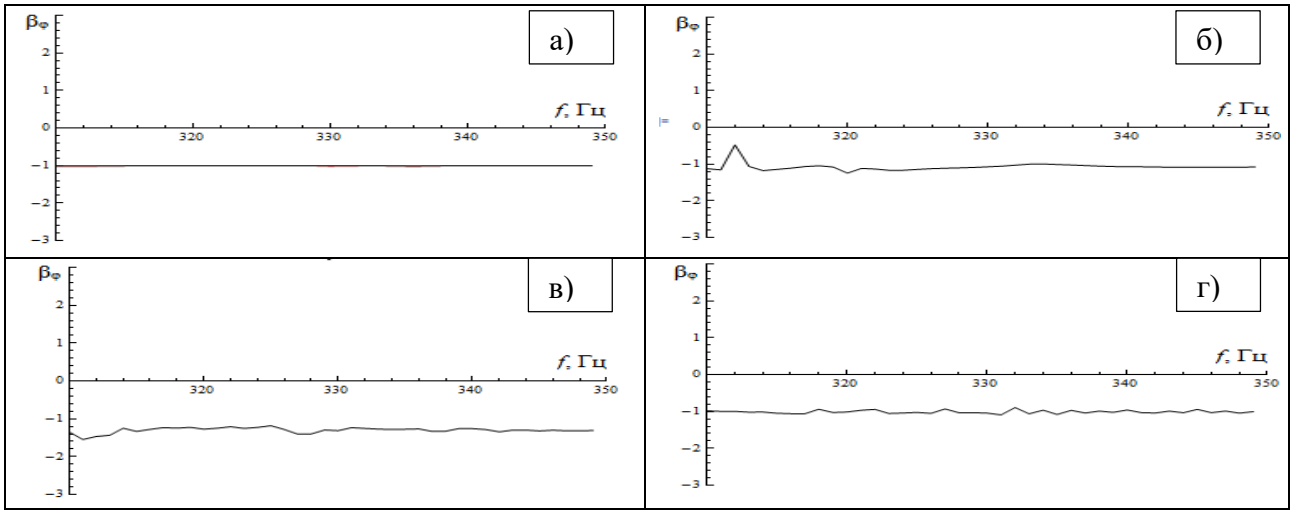


Рис. 6 Б. Частотные зависимости ФИ вдоль линии равных фаз в ДЗАО (35000–54 000 м)— (а) сумма водных мод, (б) захваченные моды, (в) вытекающие моды, (г) сумма всех мод.

На рис. 6 А и 6 Б представлена структура поля мод в ДЗАО. В этой зоне формируется зона конвергенции, где должны доминировать водные моды. Поэтому наблюдается совпадение характеристик «всех мод» и водных мод, Как следствие, ЛРФ на рис. 6 А и 6 Б для всех типов мод и для суммарного поля идентичны, значения ФИ близки к (–1).

Выводы

Установлено, что касательные к линиям равной фазы являются устойчивыми и не изменяют своих свойств при изменении характеристик сигналов и условий распространения. Их величина постоянная, близкая к (–1). Стабильность этой характеристики позволяет ввести новое определение — «фазовый инвариант».

УДК: 534.222 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39459

Особенности широтной изменчивости кавитационных порогов морской воды в Индийском океане

Н.П. Мельников

ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта», Россия, 603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5.

ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Научно-исследовательский радиофизический институт, Россия, 603950, Нижний Новгород, ул. Большая Печерская, 12 А

E-mail:melnikov50@mail.ru

Аннотация: представлены результаты экспериментальных измерений величины кавитационных порогов морской воды в Индийском океане в зимний и весенний сезоны. Наблюдается ярко выраженная изменчивость величины кавитационных порогов от широты. В зимний период времени наблюдаются два максимум величины кавитационной прочности на разных широтах в районе экватора (5° N – 20° S). В весенний период времени наблюдается один максимум в районе экватора (5° N – 15° S). Такое существенное различие в характере изменчивости величины кавитационной прочности связано с сезонной сменой течений в северной части Индийского океана, вызванной муссонной циркуляцией.

Ключевые слова: кавитационный порог, кавитационная прочность морской воды

Features of latitudinal variability of cavitation strength of sea water in the Indian ocean

N.P. Melnikov

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Volga State University of Water Transport", Russia, 603950, Nizhny Novgorod, Nesterov St., 5.

Radiophysical Research Institute, National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia, 25/12a Bolshaya Pecherskaya str.

Abstract: The results of experimental measurements of seawater cavitation thresholds in the Indian Ocean during the winter and spring seasons are presented. A pronounced variability in cavitation thresholds with latitude is observed. In winter, two maxima of cavitation strength are observed at different latitudes near the equator (5° N – 20° S). In spring, a single maximum is observed near the equator (5° N – 15° S). This significant difference in the variability of cavitation strength is associated with seasonal changes in currents in the northern Indian Ocean caused by monsoon circulation.

Keywords: cavitation threshold, cavitation strength of sea water
PACS: 43.25.+y

Введение

При понижении давления в жидкости возникает кавитация, которая проявляется в виде пузырьков или в виде разрывов жидкости. Различают гидродинамическую и акустическую кавитацию. Акустическая кавитация возникает в морской воде под действием мощных акустических полей, когда амплитуда акустического поля превышает некоторую пороговую величину. Эту величину называют порогом кавитации или кавитационной прочностью жидкости на разрыв. Согласно общепринятому представлению кавитационная прочность является физической характеристикой жидкости и однозначно зависит от её физико-химических свойств. Экспериментальные значения величины кавитационной прочности, полученные различными авторами [1 -3] имеют значительные расхождения. По видимому это связано с тем, что сам процесс измерения и измерительная система неизбежно изменяют характеристики жидкости, в частности, размеры кавитационных зародышей и их функции распределения по размерам и по пространству. Поэтому, в случае акустической кавитации, на наш взгляд, более точно говорить не о «кавитационной прочности», а о «кавитационном пороге». Величина кавитационного порога зависит как от среды (жидкость с парогазовыми или другими зародышами кавитации), так и от измерительной системы (акустические концентраторы, гидрофоны и другие измерительные средства), а также, как от методики измерения (в частности, от критерия возникновения кавитации), так и от характера акустического воздействия (особенно от характера распределения амплитуд акустического поля и его частоты).

В связи с тем, что известные лабораторные способы, применяемые при исследовании прочности, перенести в натурные условия очень сложно используется методика, основанная на измерениях не самой прочности, а порога кавитации.

Измерения кавитационных порогов всегда основаны на регистрации параметра какого-либо явления, специфического для кавитации и возникающего вместе с ней. Такая методика обладает естественным недостатком, обусловленным различием между прочностью жидкости как физической характеристики невозмущенной среды, подлежащей исследованию, и кавитационной прочностью, которая характеризуется совокупностью среда – измерительная система.

Под порогом акустической кавитации в работе принята амплитуда звукового давления в момент возникновения кавитации. С целью уменьшения искажающего влияния внешнего воздействия на первоначальное распределение зародышей использована методика регистрации момента возникновения кавитации в свободной жидкости, то есть вдали от излучающих поверхностей. В этом случае основные закономерности и характер зависимостей

прочности от исследуемых свойств жидкости аналогичны экспериментально получаемым зависимостям кавитационной прочности от тех же параметров.

Все измерения кавитационных порогов производились по единой методике. Методика измерений кавитационной прочности морской воды в различных районах Мирового океана, экспериментальная установка для её измерений, а также критерии возникновения кавитации приведены в работе [4]. В нашей экспериментальной установке в качестве критерия появления кавитации использовано появление акустического кавитационного шума выше некоторой заданной величины. Все измерения кавитационной прочности морской воды проведены на частоте возбуждения кавитации 10 кГц.

Кавитационная прочность морской воды зависит от гидрологических, гидрофизических, гидрохимических и гидробиологических параметров [4-10], а её изменчивость связана с изменчивостью этих параметров. Как известно, существует глобальная широтная изменчивость всех основных характеристик морской воды: температуры, солености, газосодержания, кислотности, щелочности и других [6, 7].

1 Натурные измерения кавитационных порогов морской воды

Измерения кавитационных порогов в Индийском океане выполнены в феврале 1978 г. на разрезе, пересекающем южную субтропическую конвергенцию, Южное пассатное течение, Экваториальное противотечение и Северное пассатное течение от точки с координатами 30° ю.ш. до точки с координатами 10° с.ш. (Рис. 1) [6], и в марте-апреле 1987 года от точки с широтой 20° с.ш. в Аравийском море до точки с широтой около 45° ю.ш. в южной части Индийского океана (Рис. 2) [7].

В северной части Индийского океана наблюдается сезонная смена течений, вызванная муссонной циркуляцией. Зимой устанавливается Северо-восточное муссонное течение, начинающееся в Бенгальском заливе. Южнее 10° с.ш. это течение переходит в Западное течение, пересекающее океан от Никобарских островов до берегов Восточной Африки. Далее оно разветвляется: одна ветвь идёт на север в Красное море, другая— на юг до 10° ю.ш. и, повернув на восток, даёт начало Экваториальному противотечению. Последнее пересекает океан и у берегов Суматры вновь разделяется на часть, уходящую в Андаманское море и основную ветвь, которая направляется в Тихий океан (Рис. 1.) Летом юго-западный муссон обеспечивает перемещение всей массы поверхностных вод на восток, и Экваториальное противотечение исчезает. Летнее муссонное течение начинается у берегов Африки мощным Сомалийским течением, к которому в районе Аденского залива присоединяется течение из Красного моря. В Бенгальском заливе летнее муссонное течение разделяется на северное и южное, которое вливается в Южное Пассатное течение (Рис. 2).

На рис. 3 приведены координаты станций, при измерении кавитационных порогов в апреле 1987 года.

Результаты измерений порогов акустической кавитации в феврале 1978 года приведены на рис. 4. Изменчивость величины кавитационной прочности морской воды



Рис. 1 Течения Индийского океана. Осенний-Зимний сезон

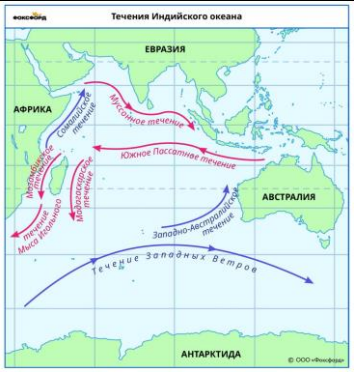


Рис. 2 Течения Индийского океана. Весенний-Летний сезон

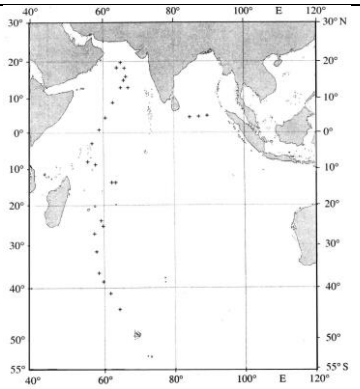


Рис.3 Расположение станций в Индийском океане при измерении порогов кавитации в апреле 1987 года

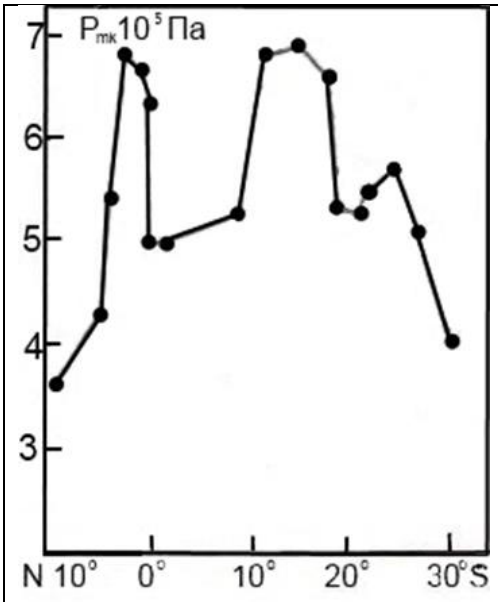


Рис. 4 Зависимость кавитационной прочности P_{mk} от географической широты в Индийском океане при измерениях в феврале 1978 года на глубине 20 м.

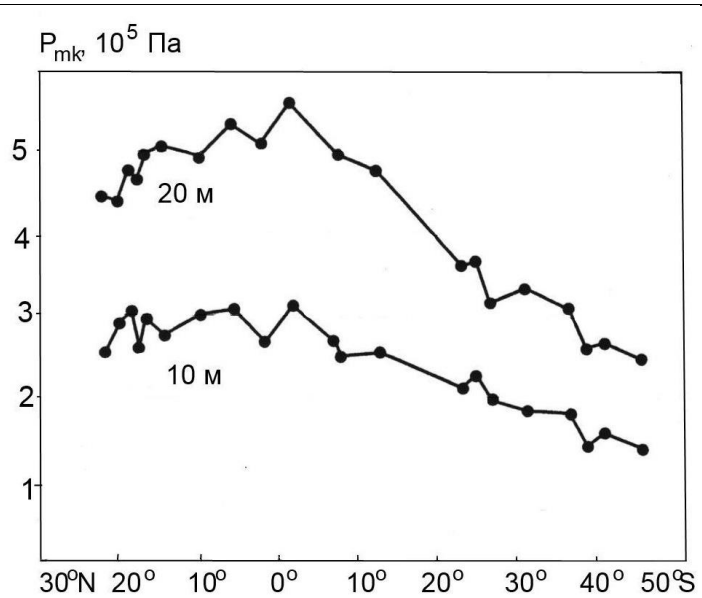


Рис. 5 Зависимость кавитационной прочности P_{mk} от географической широты в Индийском океане при измерениях в апреле 1987 года

при движении судна с юга на север в целом отражает сложную динамику вод Индийского океана на этой долготе. В начале разреза на широте 29° ю.ш., 52° в.д. величина кавитационных порогов составляет $P_{mk} = 3{,}6 \cdot 10^5$ Па. При движении судна на север курсом 45° величина кавитационных порогов растет и в районе 25° ю.ш. – 20° ю.ш. выходит на плато $P_{mk} = (5 – 5{,}5) \cdot 10^5$ Па. При дальнейшем движении судна к экватору величина кавитационных порогов

резко вырастает, на широте 15° ю.ш. достигает величины около $P_{mk}=6{,}9\cdot10^5$ Па и остается практически неизменной в интервале от 15° ю.ш. до 10° ю.ш. Затем судно выходит из вод Южного пассатного течения и входит в воды Экваториального противотечения шириной от 10° ю.ш. до 0°. В этих водах величина кавитационных порогов снижается до величины порядка $P_{mk} = 5\cdot10^5$ Па. Такой провал связан, по видимому, с пересечением в этом райне гидрохимического фронта. При вхождении судна в Северное пассатное течение величина кавитационной прочности возрастает до величины $P_{mk} = 6{,}9\cdot10^5$ Па, остается неизменным в районе 0° – 5° с.ш. и резко спадает на интервале широт от 5° с.ш. до 10° с.ш. до величины порядка $P_{mk} = 3{,}6\bullet10^5$ Па.

Широтная зависимость кавитационной прочности морской воды в Индийском океане при измерениях в апреле 1987 года приведена на рис. 5. При движении с севера на юг судно пересекло Муссонное течение между 20° с.ш. и 10° с.ш; Сомалийское течение в районе экватора и пересекло Южное пассатное течение между экватором и 10° ю.ш.; прошло в Мадагаскарском течении от 10° ю.ш. до 30° ю.ш.; пройдя от 30° ю.ш. до 40° ю.ш., судно в районе 40° ю.ш. пересекло Течение Западных ветров. Измерения кавитационных порогов проведены на двух глубинах: 10 м и 20 м. Между измерениями наблюдается хорошая корреляция. Наибольшие значения кавитационных порогов на глубине 20 м наблюдаются в районе экватора $P_{mk} = 5{,}5\cdot10^5$ Па. По мере увеличения широты в северном полушарии величина кавитационных порогов уменьшается, причем в районе экватора при пересечении Сомалийского имеется некоторое уменьшение этой величины. В районе 10° с.ш. при пересечении Муссонного течения эта величина так же несколько уменьшается. И далее равномерно спадает до величины порядка $P_{mk} = 4{,}5\cdot10^5$ Па. При движении судна от экватора на юг, величина кавитационных порогов равномерно снижается с некоторым уменьшением в районе 28° ю.ш. (Мадагаскарское течение) и в районе 40° ю.ш. (Течение западных ветров). В самой южной точке измерений величина кавитационного порога $P_{mk} = 2{,}3\cdot10^5$ Па.

Заключение.

Широтная зависимость кавитационной прочность морской воды – это экспериментальный факт, подтвержденный измерениями этой величины не только в Индийском, но и в Атлантическом и в Тихом океанах [6, 7]. При этих измерениях особенно ярко проявились сезонные отличия в Индийском океане. Широтная зависимость кавитационной прочности в Индийском океане в зимний и весенний сезоны имеет существенно разный характер. И эти отличия обусловлены появлением в зимний сезон Экваториального противотечения. В Атлантическом океане сезонные отличия имеют другой характер. В зимний сезон максимальная величина кавитационной прочности лежит чуть севернее экватора, а в летний сезон максимум смещается в Южное полушарие [6, 7]. Для Тихого океана широтных

измерений кавитационных порогов глобального характера в разные сезоны нет. Таким образом величина кавитационных порогов морской воды существенно зависит от водных масс.

Список литературы

1. *Буланов В.А.* Введение в акустическую спектроскопию микронеоднородных жидкостей // Владивосток, Дальнаука, 2001г, 278 С.
2. *Рой Н.А.* Обзор. Возникновение и протекание ультразвуковой кавитации // Акуст. журн., 1957, **3**, № 1, С. 3-18.
3. *Сиротюк М.Г.* Обзор Ультразвуковая кавитация. // Акуст. журн, 1962, **8**, № 3, С. 255-272.
4. *Мельников Н.П., Елистратов В.П.* Мезомасштабная пространственная изменчивость кавитационных порогов морской воды // Акустический журнал, 2017, **63,** №2, С.187 – 195.
5. *Ильичев В.И., Елистратов В.П., Корец В.Л., Кузнецов Г.Н., Мельников Н.П.* Пространственная изменчивость кавитационных порогов в некоторых динамически активных зонах мирового океана // Докл. АН СССР, 1990, **312**, № 4, С. 974 – 977.
6. *Ильичев В.И., Елистратов В.П., Корец В.Л., Мельников Н.П.* Широтная изменчивость кавитационной прочности // Докл. АН СССР, 1992, **324**, № 5, С. 1108-1110.
7. *Акуличев В.А., Ильичев В.И* Пороги акустической кавитации в морской воде в различных районах Мирового океана. // Акуст. журн., 2005, **51**, № 2, С. 167-179.
8. *Мельников Н.П., Елистратов В.П.* Временная изменчивость кавитационных порогов морской воды // Учен. зап. физ. фак-та Моск. ун-та. 2014. № 6. 146340 (1-7).
9. *Мельников Н.П.* Корреляционные связи кавитационных порогов с гидрологическими, гидрофизическими и гидрохимическими параметрами морской воды // Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики: труды Всероссийской конференции.- СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. -465 с. С. 247-250.
10. *Мельников Н.П.* Изменчивость кавитационного порога морской воды в натурных условиях // Акустический журнал, 2024, **70,** №4, с.116 – 125.

УДК: 534.23 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39460

Экспериментальная оценка помехоустойчивости комбинированного приемника с помощью глайдера

Н.В. Злобина, С.Б. Касаткин

Институт проблем морских технологий им. акад. М.Д. Агеева ДВО РАН,

Росиия, 690091, Владивосток, ул. Суханова 5а

E-mail: zlobina@marine.febras.ru, kasatkas@marine.febras.ru

Глайдер, оснащенный парой комбинированных гидроакустических приемников, использовался для освещения подводной обстановки в мелком море. Выполнен спектральный анализ и получена численная оценка помехоустойчивости комбинированного приёмника при мультипликативных алгоритмах обработки скалярных, векторных и тензорных параметров, характеризующих звуковое поле в низкочастотном диапазоне. Результаты обработки экспериментальных данных подтверждают потенциальное увеличение помехоустойчивости комбинированного приёмника при увеличении числа информативных параметров звукового поля в скалярном, векторном и тензорном описании.

Ключевые слова: комбинированный гидроакустический приемник, помехоустойчивость, обработка сигналов, вектор интенсивности, ротор вектора интенсивности, мелкое море.

Experimental evaluation of the noise immunity of a combined receiver using a glider

N.V. Zlobina, S.B. Kasatkin

M.D. Ageev Institute of Marine Technology Problems FEB RAS,

5a Suchanov str., Vladivostok, 690091, Russia

E-mail: zlobina@marine.febras.ru, kasatkas@marine.febras.ru

A glider equipped with a pair of combined hydroacoustic receivers was used to surveillance the underwater environment in shallow water. A spectral analysis was performed and a numerical estimate of the noise immunity of a combined receiver was obtained using multiplicative algorithms for processing scalar, vector and tensor parameters characterizing the sound field in the low-frequency range. The results of experimental data processing confirm the potential

increase in noise immunity of the combined receiver with an increased number of informative sound field parameters in scalar, vector, and tensor descriptions.

Keywords: combined hydroacoustic receiver, noise immunity, signal processing, intensity vector, intensity vector rotor, shallow water.

PACS: 43.30.+m.

Введение

Помехоустойчивость приемной системы играет важную роль для реализации успешного приема слабых сигналов на фоне шумовой помехи [1, 2]. Резервом помехоустойчивости комбинированного приемника может служить увеличение числа информативных параметров, характеризующих звуковое поле, за счет измерения в каналах приемника скалярных и векторных величин. Максимальная помехоустойчивость комбинированного приемника может быть реализована при использовании мультипликативных алгоритмов обработки полного набора информативных параметров, опеделяющих скалярно-векторную структуру звукового поля [3]. Существенную роль в в повышении помехоустойчивости играет также время накопления информации и особенности поля шумовой помехи. В докладе представлена оценка помехоустойчивости для пары комбинированных 4-х канальных приемников, установленных на подводном глайдере

Экспериментальной определение помехоустойчивости

Экспериментальное определение помехоустойчивости для комбинированного приемника, данное в работе [4], позволяет производить анализ шумового поля источника через различное количество энергетических параметров, которые в свою очередь определены через канал звукового давления $p(t)$ и 3 канала ортогональных компонент колебательной скорости $v_x(t),\ v_y(t),\ v_z(t)$.

$$\Pi_{i1} = \max\left(\frac{S}{N}\right)_{i1} - \left(\frac{S}{N}\right)_0, \left(\frac{S}{N}\right)_{i1} = 10\log\frac{\left|\bar{I}_i(S+N) - \bar{I}_i(N)\right|}{\left|\bar{I}_i(N)\right|},\ \ i = x, y, z, \tag{1}$$

$$\Pi_{i2} = \max\left(\frac{S}{N}\right)_{i2} - \left(\frac{S}{N}\right)_0, \left(\frac{S}{N}\right)_{i2} = 10\log\frac{\left|\bar{I}_i(S+N) - \bar{I}_i(N)\right|}{\left|D_i(N)\right|^{1/2}},\ \ i = x, y, z, \tag{2}$$

где $\bar{I}_i(S+N),\ \bar{I}_i(N)$ – среднее значение потока мощности в суммарном процессе сигнал плюс помеха $(S+N)$ и в поле шумовой помехи N в i канале приемника, $D_i(N)$ – дисперсия потока мощности в i канале приемника, $i = 0$ соответствует каналу звукового давления, $i = x, y, z$ соответствуют векторным каналам.

В определении (1) под помехой понимается средний поток мощности в поле помехи и является предпочтительным в звуковом поле помехи с высоким уровнем изотропной составляющей. Время усреднения изотропной составляющей составляет 50–60 с, тем самым увеличивается и помехоустойчивость комбинированного приемника. По оценкам работ [5, 6] вклад от усреднения изотропной составляющей увеличивает помехоустойчивость на 10 дБ.

Определение (2) является предпочтительным, если сигнальная составляющая суммарного процесса является детерминированным стационарным процессом. В этом случае суммарный процесс сигнал плюс помеха $(S+N)$ и помеха N имеют одну статистику (по Гауссу). Процедура усреднения суммарного процесса одновременно уменьшает дисперсию суммарного процесса и помех, повышая различимость сигнальной составляющей и помехоустойчивость. Если сигнальная составляющая сформирована движущимся источником в условиях мелкого моря на низких частотах [7], то суммарный процесс сигнал плюс помеха является нестационарным процессом, статистика которого не будет Гауссовой. Процедура усреднения не приведет к уменьшению дисперсии суммарного процесса сигнал плюс помеха и помехи и соответственно к увеличению помехоустойчивости. Численная оценка звукового поля источника может изменятся в широких пределах в зависимости от алгоритмов аппроксимации комплексной амплитуды шумовой помеха и количества энергетических параметров, соответственно и отношение сигнал/помеха и величина помехоустойчивости комбинированного приемника.

Набор энергетических параметров звукового поля источника включает в себя 16 величин, определенных через мультипликативные алгоритмы экспериментальных данных комбинированного 4-х канального приемника: $A_1 = |p|^2$ скалярная интенсивность, $A_{2,3,4} = \mathrm{Re}(p \cdot v^*_{x,y,z})$ вещественная компонента вектора интенсивности, $A_{5,6,7} = \mathrm{Im}(p \cdot v^*_{x,y,z})$ мнимая компонента вектора интенсивности, $A_{8,9,10} = \mathrm{rot}_{x,y,z}\,\bar{I}$, вещественный ротор вектора интенсивности и комплексный вектор градиента давления $A_{11} = g^2_{1x}$, $A_{12} = g^2_{1y}$, $A_{13} = g^2_{1z}$, $A_{14} = g^2_{2x}$, $A_{15} = g^2_{2y}$, $A_{16} = g^2_{2z}$. Описанные 16 параметров составляют скалярное, векторное и тензорное описание звукового поля.

На рис. 1 представлена блок-схема обработки всей сигнальной информации с комбинированного 4-х канального приемника. Блок обработки сигнальной информации вычисляет энергетические параметры, а компаратор сравнивает их по критерию максимального отношения сигнал/помеха (*S*/*N*). Результирующая 3-х мерная спектрограмма в осях частота, время и уровень на выходе компаратора содержит отсчеты только с

максимальным уровнем энергии звукового поля, что чрезвычайно важно для обнаружения сигналов от малошумных объектов.

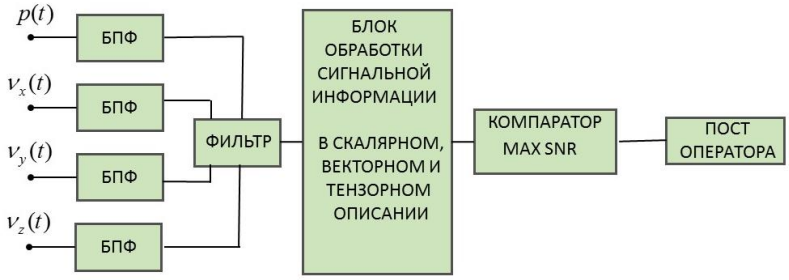
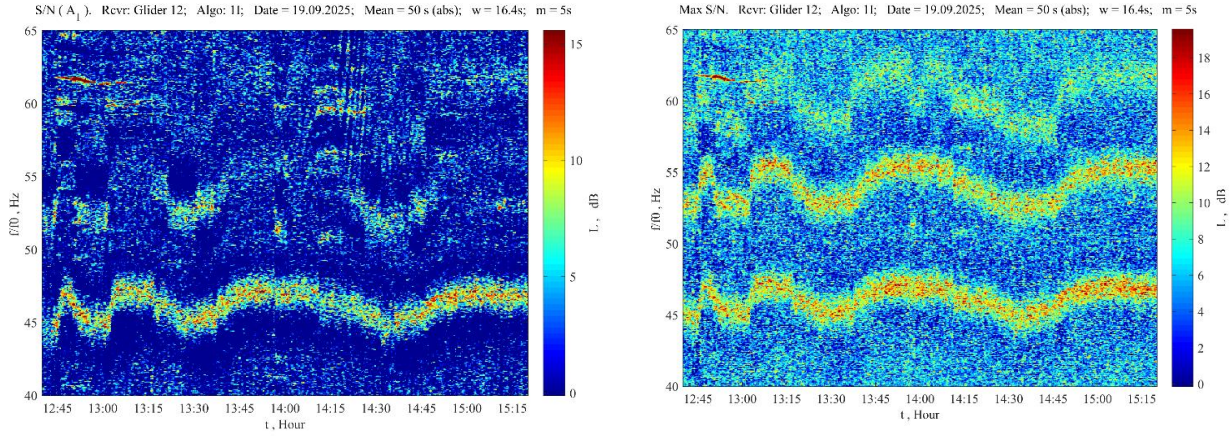


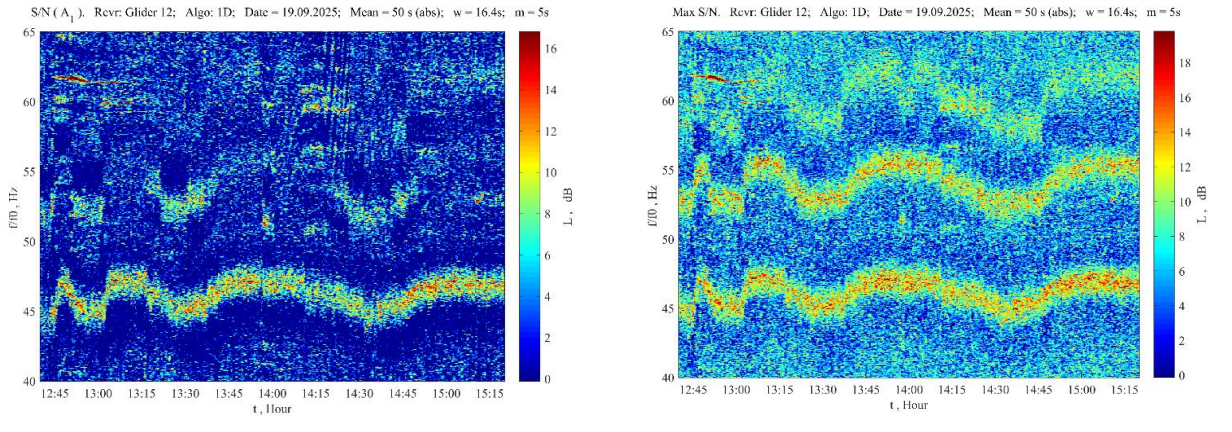
Рис. 1. Блок схема обработки сигнальной информации с комбинированного 4-х канального приемника.

Спектральному анализу были подвергнуты экспериментальные данные, полученные от пары комбинированных 4-х канальных приемников, установленных на подводном глайдере. Эксперимент проводился в Уссурийском заливе (Японское море) в сентябре 2025 г. в условиях мелкого моря при контролируемых перемещениях глайдера по глубине. Ориентация векторных каналов XY соответствовала осям волновода. Выигрыш от использования данного подхода продемонстрирован на рис. 2–5.



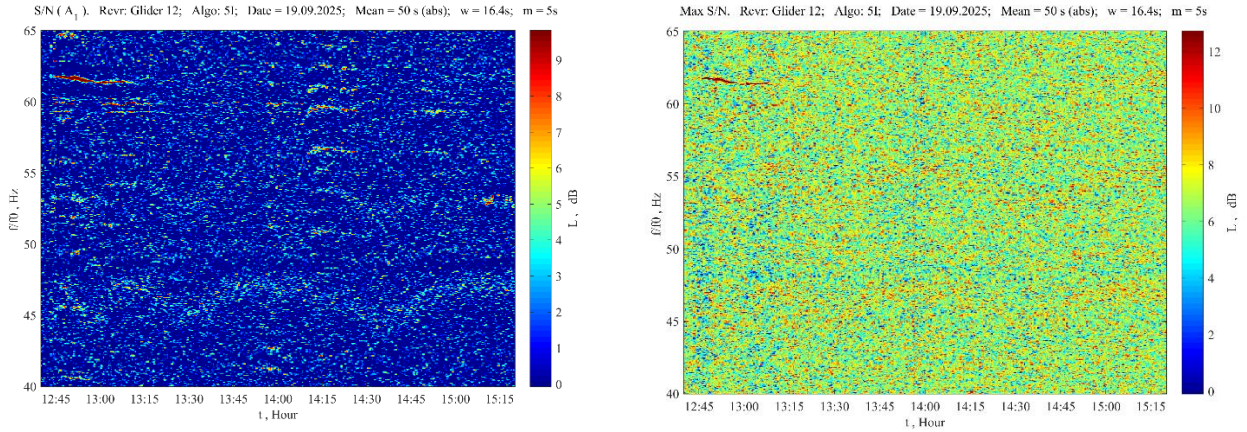
а) б)

Рис. 2. Нормированная спектрограмма отношения сигнал/помеха в канале звукового давления (а) и на выходе компаратора (б) при использовании линейного алгоритма выделения помехи из суммарного процесс ($S+N$) и определения помехоустойчивости (1).



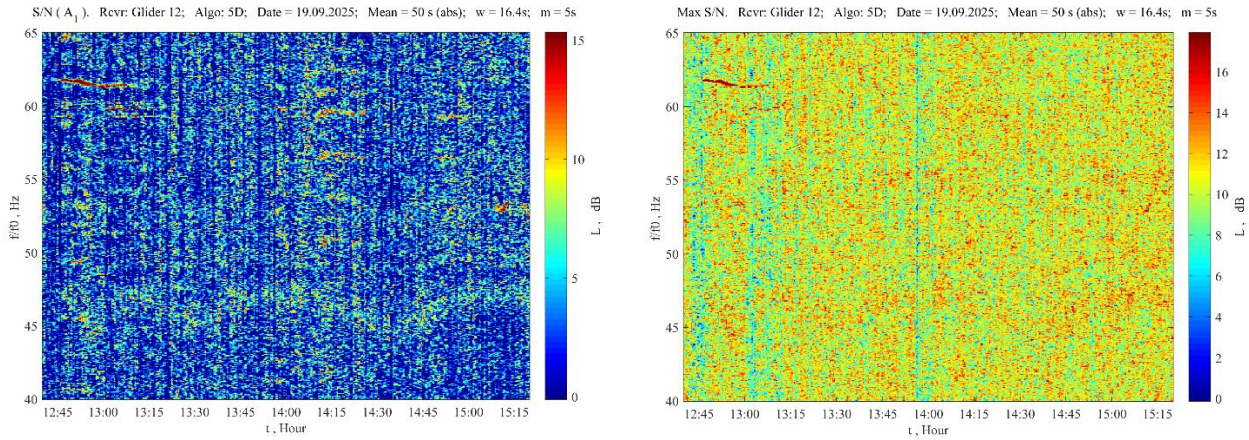
а) б)

Рис. 3. Нормированная спектрограмма отношения сигнал/помеха в канале звукового давления (а) и на выходе компаратора (б) при использовании линейного алгоритма выделения помехи из суммарного процесс ($S+N$) и определения помехоустойчивости (2).



а) б)

Рис. 4. Нормированная спектрограмма отношения сигнал/помеха в канале звукового давления (а) и на выходе компаратора (б) при использовании нелинейного алгоритма выделения помехи из суммарного процесс ($S+N$) и определения помехоустойчивости (1).



а) б)

Рис. 5. Нормированная спектрограмма отношения сигнал/помеха в канале звукового давления (а) и на выходе компаратора (б) при использовании нелинейного алгоритма выделения помехи из суммарного процесс ($S+N$) и определения помехоустойчивости (2).

Заключение

Комбинированные приемники, установленные на глайдере позволяют контролировать подводную обстановку в широком частотном диапазоне в условиях мелкого моря. На основе первичного спектрального анализа получены различные оценки звукового поля источника при движении глайдера по глубине. Разброс численных оценок связано с использованием различных алгоритмов аппроксимации помехи в суммарном поле. При помощи экспериментальных данных продемонстрировано увеличение отношения сигнал/помеха на

выходе блока обработки информации (компаратора) по сравнению с каналом звукового давления. Расширенное описание звукового поля через скалярные, векторные и тензорные величины дает самое полное энергетическое представление о поле источника.

Список литературы

1. *Смарышев М.Д.* Сравнительная оценка помехоустойчивости антенн, состоящих из комбинированных приёмников, в анизотропном поле помех // Гидроакустика. 2006. № 6. С. 18- 24.
2. *Казаков М.Н.* Оценка целесообразности использования приёмников колебательной скорости в многоканальных гидроакустических системах // Наука, техника и образование. 2018. № 5 (46). С. 19-22.
3. *Zlobina N., Kasatkin S.* Physical principles of implementing increased noise immunity of a combined receiver based on marine / Proceeding of 2025 International Conference on Ocean Studies (ICOS). P. 45-48.
4. *Гордиенко В.А.* Векторно-фазовые методы в акустике. М.: Физматлит, 2007. 479 с.
5. *Щуров В.А.* Векторная акустика океана. Владивосток, Дальнаука, 2003. 308 с.
6. *Дзюба В.П.* Скалярно-векторные методы в акустике. Владивосток, Дальнаука, 2006. 194 с.
7. *Касаткин Б.А., Злобина Н.В., Касаткин С.Б., Косарев Г.В. Злобин Д.В., Ларионов Ю.Г.* Экспериментальные и теоретические исследования скалярно-векторной структуры звуковых полей в заливе Посьета // Подводные исследования и робототехника. 2015. №1(19). С. 40-51.

УДК: 534.23 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39461

Опыт использования приемной системы для освещения подводной обстановки

Н.В. Злобина, С.Б. Касаткин

Институт проблем морских технологий им. акад. М.Д. Агеева ДВО РАН,

Россия, 690091, Владивосток, ул. Суханова 5а

E-mail: zlobina@marine.febras.ru, kasatkas@marine.febras.ru

На основе анализа экспериментальных данных показаны возможности малогабаритных гидроакустических приемных систем на базе комбинированных приемников, регистрирующих поток акустической мощности при обнаружении слабых сигналов на фоне шумов мелкого моря в инфразвуковом частотном диапазоне. Применение первичного спектрального анализа по 16 энергетическим величинам позволяет повысить отношение сигнал/помеха, а работа в инфразвуковом диапазоне дает выигрыш в дальности обнаружения. Вторичный спектральный анализ используется для поддержания контакта с источником через частотный диапазон, определенный в первичном спектре. В анализе участвуют те же 16 энергетических параметров, а на выходе блока обработки получается результирующая спектрограмма звукового поля. Использование данной технологии во вторичном спектральном анализе дает повышение отношения сигнал/помеха и повышенную численную оценку помехоустойчивости.

Ключевые слова: комбинированный гидроакустический приемник, помехоустойчивость, спектральная обработка сигналов, пеленгование, мелкое море.

Experience using a receiving system for underwater surveillance

N.V. Zlobina, S.B. Kasatkin

M.D. Ageyev Institute of Marine Technology Problems FEB RAS,

5a Suchanov str., Vladivostok, 690091, Russia

E-mail: zlobina@marine.febras.ru, kasatkas@marine.febras.ru

The capabilities of small-sized hydroacoustic receiving systems based on combined receivers that record the flow of acoustic power when detecting weak signals against the background of shallow sea noise in the infrasound frequency range are shown, based on the analysis of experimental data. The use of primary spectral analysis across 16 energy quantities allows for an increased signal-to-noise ratio, while operation in the infrasound range provides an advantage in detection range. Secondary spectrum analysis is used to maintain contact with the source

through the frequency range defined in the primary spectrum. The same 16 energy parameters are used in the analysis, and the resulting spectrogram of the sound field is formed at the output of the processing unit. The application of this technology in secondary spectral analysis results in an increase in the signal-to-noise ratio and an improved numerical estimate of noise immunity.

Keywords: combined hydroacoustic receiver, noise immunity, spectral signal processing, direction finding, shallow water.

PACS: 43.30.+m.

Введение

Используемые в гидроакустике комбинированные приемники включают в себя приемник давления и три векторных канала, позволяющих измерять компоненты колебательной скорости. Внедрение в практическую работу таких приемников дало возможность использовать в измерениях скалярные и векторные величины, а также исследовать звукового поля шумящего объекта при помощи векторно-фазовых методов [1–4]. Используя измеряемые в векторных каналах величины можно непосредственно вычислить вещественные и мнимые компоненты вектора интенсивности, компоненты ротора вектора интенсивности и компоненты вектора градиента давления, увеличив чисто информативных параметров звукового поля до 16 [5]. Применение первичного спектрального анализа по 16 энергетическим величинам позволяет повысить отношение сигнал/помеха, а работа в инфразвуковом диапазоне дает выигрыш в дальности обнаружения. Таким образом, комбинированные приемники извлекают значительно больше информации о звуковом поле по сравнению с гидрофонами и позволяют решать прикладные задачи на современном уровне без существенного увеличения габаритов самой приемной системы.

Экспериментальные результаты

Для проведения эксперимента по освещению подводной обстановки в мелком море использовался подводный глайдер, оснащенный парой комбинированных гидроакустических приемников. Морской эксперимент выполнялся на акватории Уссурийского залива (Японское море) Карта проведения эксперимента и используемая аппаратура показаны на рис. 1.

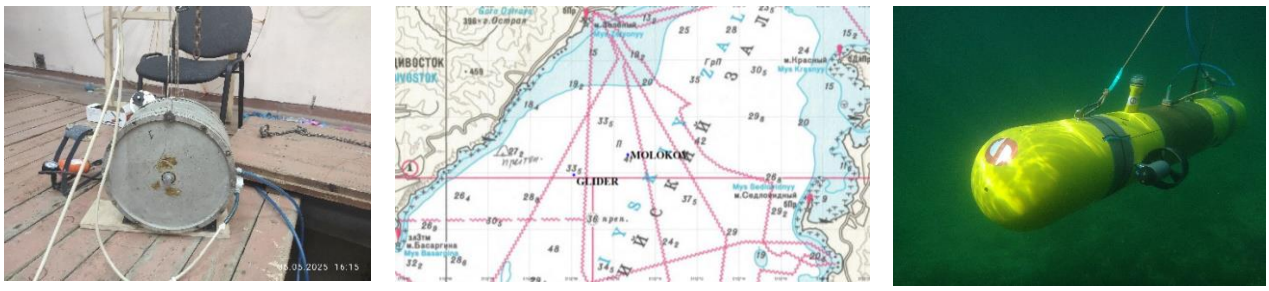
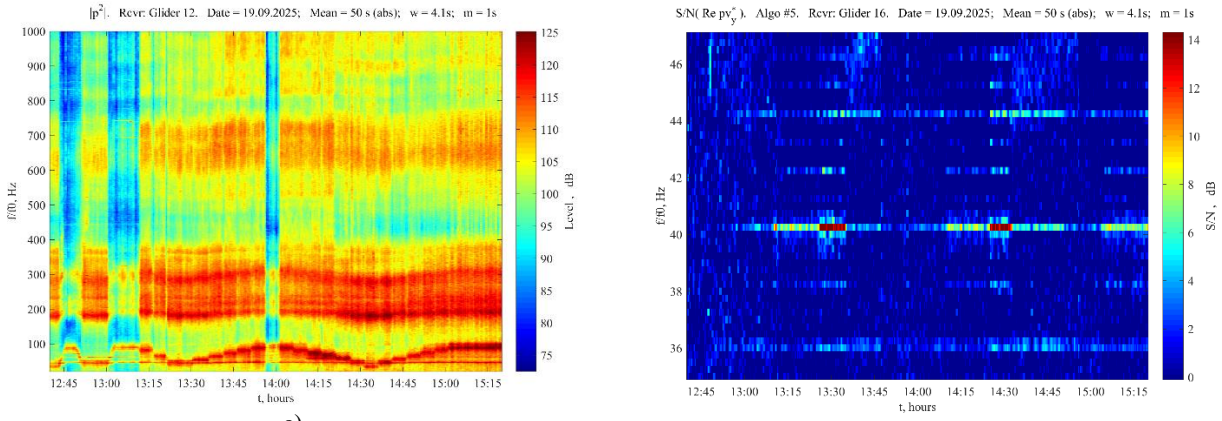


Рис. 1. Внешний вид электромагнитного излучателя, карта эксперимента и глайдер.

Расстояние между глайдером и излучателем не изменялось и составляло 3.5 км. Судно обеспечения НИС «Юрий Молоков» стояло на якоре, как и резиновая лодка с оператором глайдера. Электромагнитный излучатель устанавливался на середину глубины места, а глайдер совершал плавные вертикальные перемещения вверх и вниз, проходя горизонт позиционирования излучателя. Векторные каналы приемника XY были ориентированы вдоль осей волновода. Отклонения глайдера от вертикального положения нивелировалось подвешенным грузом.

При спектральной обработке принятых сигналов использовалось скалярные и векторные характеристики звукового поля. Нормированные спектрограммы представлены на рис. 2.



а) б)

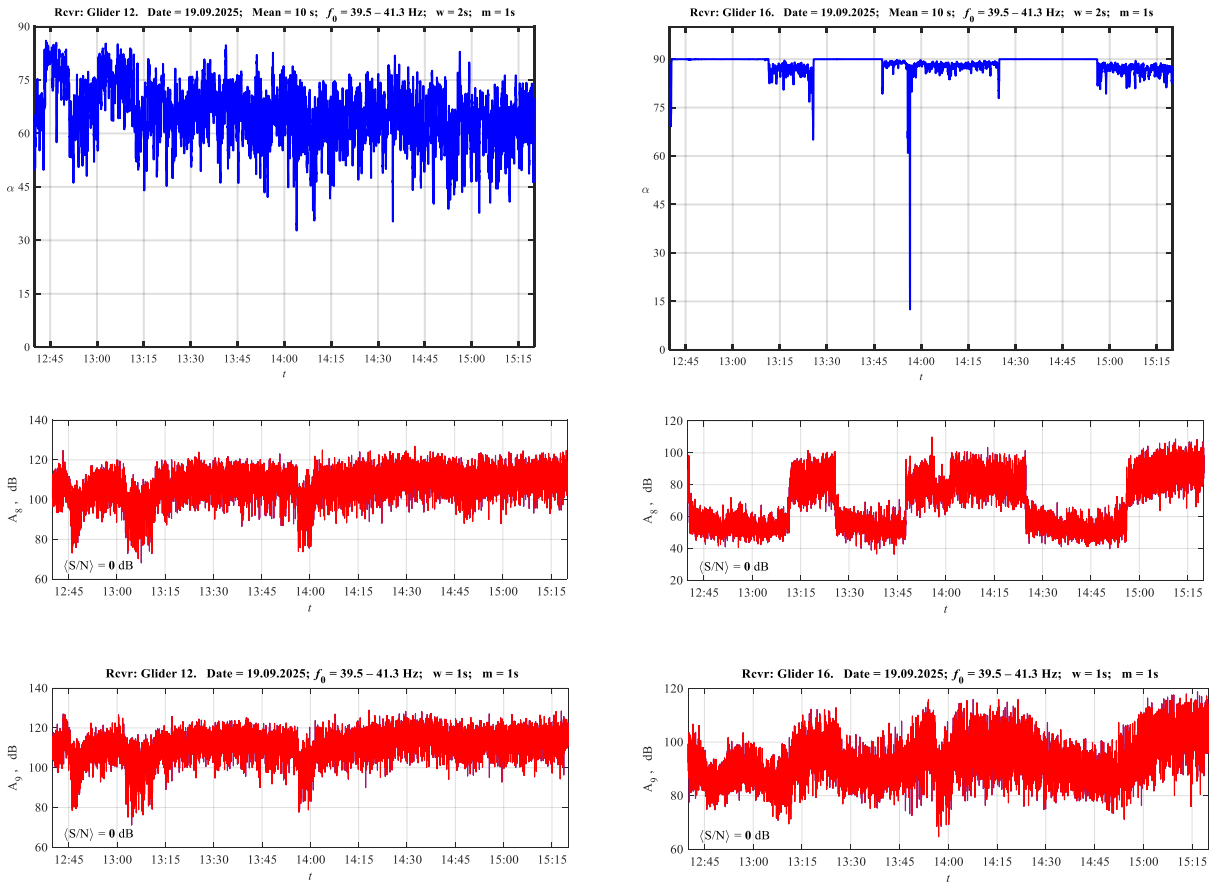
Рис. 2. Нормированная спектрограмма скалярной интенсивности (а) приемника №12 и нормированная спектрограмма отношения сигнал/помеха вещественной компоненты вектора интенсивности $\mathrm{Re}(pv_y^*)$ (б) приемника №16.

Спектрограмма на рис. 2, *а* отражает волнообразный характер повышенного уровня сигнальной составляющей при вертикальном перемещении аппарата по глубине волновода. Спектрограмма отношения сигнал/помеха на рис. 2, *б* показывает регистрируемый сигнал излучения в выбранной частотной области шириной 12 Гц с временным усреднением 50 с. Вещественная компонента вектора интенсивности описывает бегущие волны от источника, мнимая компонента - стоячие волны. Уровень суммарного поля соизмерим во всех векторных каналах.

С помощью комбинированного приемника можно непосредственно определять направление на шумящий объект, что является особенно важным в прикладных задачах. Результат вычисления курсового угла представлен на рис. 4. Для определения азимутального угла был использован ротор вектора интенсивности

$$\alpha = \mathrm{arctg}\frac{rot_y I}{rot_x I} = \mathrm{arctg}\frac{A_9}{A_8}.$$

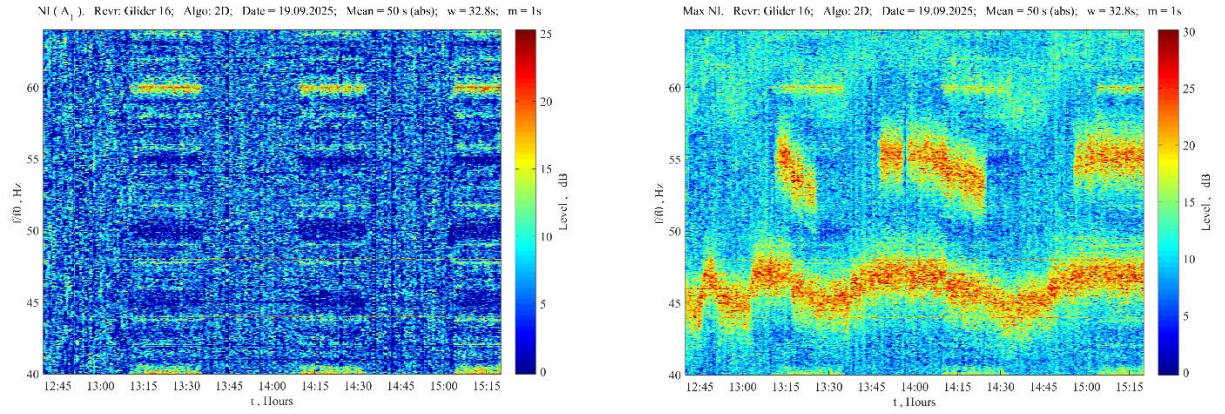
Зависимость азимутального угла от времени наблюдения показана на рис. 3. Значения азимутального угла ~40º при узкополосном анализе при Δf=1.8 Гц и малом времени усреднения, равном 10 с, подвержены флуктуациям, что может объясняться изменением уровней энергии от 40 до 60 дБ для суммарного процесса (S+N) на проходных характеристиках по вещественной компоненте ротора для обоих приемников глайдера.



а) б)

Рис. 3. Азимутальный угол α и проходные характеристики по параметрам A_8, A_9 для приемника №12 (а) и приемника №16 (б) в полосе частот 39.5–41.3 Гц.

При работе комбинированного приемника в качестве обнаружителя слабых сигналов информация о шумовом поле помехи, как правило, отсутствует. Предполагается, что спектр шумовой помехи является сплошным, а спектр сигнала содержит дискретные составляющие, для выделения которых необходимо использование методов спектрального анализа высокого разрешения. Энергетический выигрыш от первичной спектральной обработки полного набора 16 параметров, включающий в себя скалярное, векторное и тензорное описание звукового поля источника на выходе компаратора в сравнении с каналом звукового давления при аппроксимации шумовой составляющей помехи линейным алгоритмом приведены на рис. 4.

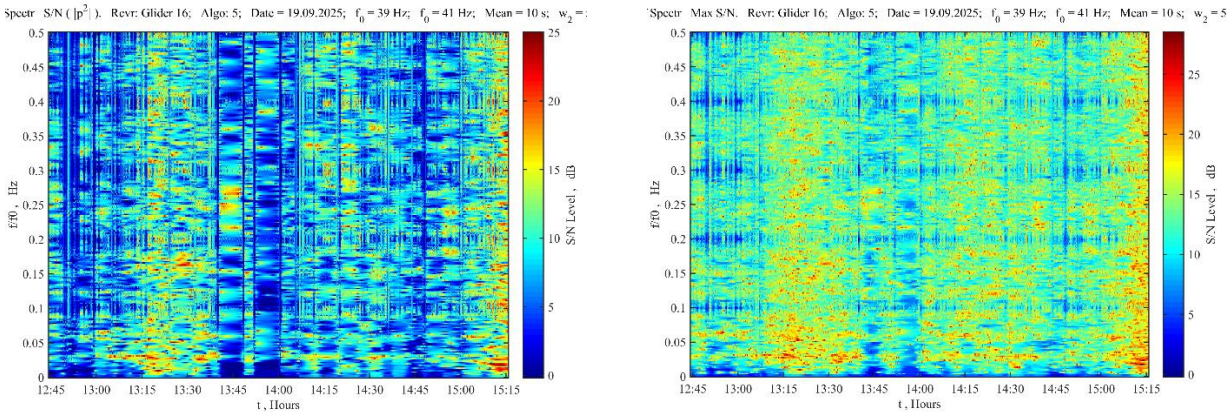


а) б)

Рис. 4. Спектрограмма отношения сигнал/помеха в канале звукового давления (а) и на выходе компаратора (б).

Отсутствующий в канале звукового давления и прекрасно определенный на выходе компаратора волнообразный процесс повышенного уровня, связанный с перемещением глайдера по глубине волновода является количественным результатом использования 16 энергетических параметров.

Использование вторичного спектрального анализа в полосе частот 39–41 Гц представлено на рис. 5, *а* для канала звукового давления и на выходе компаратора (рис. 6, *б*) при анализе 7 энергетических параметров по критерию максимального отношения сигнал/помеха.



а) б)

Рис. 5. Спектрограммы вторичного спектрального анализа для отношения сигнал/помеха в канале звукового давления (а) и результирующая на выходе компаратора (б).

Увеличение отношения сигнал/помеха на 5 дБ (рис. 5, *б*) на выходе компаратора по сравнению с каналом звукового давления достигается благодаря использованию при обработке скалярных и векторных составляющих звукового поля в каналах комбинированного приемника.

Заключение

На основе спектрального анализа получены различные оценки звукового поля источника при движении глайдера по глубине. Продемонстрировано использование первичного и вторичного спектральных анализов с увеличением отношения сигнал/помеха на выходе блока обработки информации (компаратора) в сравнении с каналом звукового давления. Расширенное описание звукового поля через скалярное, векторное и тензорное описание дает самое полное энергетическое представление о поле источника. Флуктуация значений азимутального угла при малых значениях усреднения обусловлена изменением суммарного потока акустической мощности в горизонтальной плоскости.

Список литературы

1. *Гордиенко В.А., Ильичёв В.И., Захаров Л.Н.* Векторно-фазовые методы в акустике. М.: Наука, 1989. 224 с.

2. *Щуров В.А.* Векторная акустика океана. Владивосток: Дальнаука, 2003. 308 с.

3. *Дзюба В.П.* Скалярно-векторные методы в акустике. Владивосток: Дальнаука, 2006. 194 с.

4. *Гордиенко В.А.* Векторно-фазовые методы в акустике. М.: Физматлит, 2007. 479 с.

5. Злобина Н.В., Касаткин С.Б. Вторичный спектральный анализ и его применение в гидроакустике в инфразвуковом диапазоне частот // Подводные исследования и робототехника. 2025. № 1 (51). С. 75-83.

УДК 542.34 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39462

Обоснование устойчивости характеристик фазо-энергетического инварианта в глубоком море

С.П. Аксенов[1], Г.Н. Кузнецов[1, a]

[a] Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, 119991, Россия

E-mail: [a]skbmortex@mail.ru

Аннотация: Волноводные инварианты гидроакустических полей в глубоком море позволяют повысить помехоустойчивость обнаружения слабых сигналов. Показано, что в глубоком море в условиях зимнего приповерхностного канала на всех участках горизонтальной трассы фазо-энергетический инвариант (ФЭИ) имеет в окрестности интерференционных максимумов стабильные значения, близкие к единице, в интервале «0.95-1.0». Летом в глубоком море в зависимости от расстояния между точками излучения и приема существенно изменяется амплитудно-фазовая структура звукового поля, формируются ближняя и дальняя зоны акустической освещенности (БЗАО, ДЗАО) и зона тени. Значения ФЭИ в зоне тени зависят от расстояния до источника, но в БЗАО и ДЗАО они устойчивы и близки к «+1». Результаты данной работы могут быть использованы в гидроакустической дальнометрии и связи, при поиске затонувших объектов, позиционировании морских роботов**.**

Ключевые слова: глубокое море, фазо-энергетический инвариант, интерференционные максимумы, зимние и летние условия, гидроакустическая дальнометрия.

Justification for the Stability of Characteristics of the Phase-Energy Invariant in the Deep Sea

S.P. Aksenov[1], G.N. Kuznetsov[1, a]

[1] Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow 119991, Russia

E-mail: [a]skbmortex@mail.ru

Abstract: Waveguide invariants of hydroacoustic fields in the deep sea make it possible to increase the noise immunity of detecting weak signals. It is shown that, under conditions of a winter near-surface channel, the phase-energy invariant (PEI) in the deep sea has stable values close to unity in the range "0.98-1.0" in the vicinity of interference maxima in all sections of the horizontal route. In summer, depending on the distance between the radiation and reception points, the amplitude-phase structure of the sound field in the deep sea changes significantly, and near-field and far-field zones of acoustic illumination (NFZAI and FFZAI) and shadow zone are formed. The PEI values in the

shadow zone depend on the distance to the source, but in the NFZAI and FFZAI they are stable and close to "+1". The results of this work can be used in sonar ranging and communications, in the search for sunken objects, and in the positioning of marine robots.

Keywords: deep sea, phase-energy invariant, interference maxima, winter and summer conditions, sonar ranging.

Введение

Кроме пассивной и активной гидролокации подводных объектов, большое значение в гидроакустике имеет режим прямых сигналов, когда источник излучает сигналы с известными в точке приема характеристиками. Такой режим может быть использован в гидроакустической дальнометрии и связи, при поиске затонувших объектов, позиционировании морских роботов и в других случаях. В режиме прямых сигналов достижима наиболее точная оценка расстояния между точками излучения и приема сигналов, и повышение этой точности возможно при использовании устойчивых волноводных инвариантов, не требующих детального изучения параметров глубокого моря как волновода.

В данной работе приведены результаты исследования свойств фазо-энергетического инварианта (ФЭИ) [1], которые могут быть положены в основу нового метода оценки расстояния до источника звуковых колебаний в глубоком море.

Пусть в однородном свободном пространстве ненаправленный точечный источник излучает на двух близких известных частотах звуковое поле, и комплексную огибающую (КО) звукового давления (ЗД) $P(r, f)$, создаваемого этим источником на каждой частоте f на расстоянии r, можно записать в виде

$$P(r, f) = |P(r, f)| e^{i\varphi(r, f)} = \frac{P_0(f)}{r} e^{i(kr+\varphi_0)}. \quad (1)$$

Здесь $P_0(f)$ - амплитуда гармонической составляющей ЗД на единичном расстоянии от источника, $\varphi(r, f)=kr+\varphi_0$ - фаза КО ЗД, φ_0 - начальная фаза излучаемого сигнала в источнике, одинаковая на двух близких частотах, $k = 2\pi f / c$ - волновое число, c - скорость звука. Аналогичный режим излучения и приема полигармонических сигналов рассматривался в [2] с целью повышения помехоустойчивости гидроакустической связи.

Общее определение фазо-энергетического инварианта (ФЭИ) β_{ef} [1] –

$$\beta_{ef} = \frac{r}{f} \frac{\partial\varphi / \partial r}{\partial\varphi / \partial f} = \frac{c_{gef}}{c_{\varphi ef}}, \quad (2)$$

где эффективные групповая c_{gef} и фазовая $c_{\varphi ef}$ скорости (ЭГС, ЭФС) имеют вид [1]

$$c_{gef} = 2\pi r / (\partial\varphi / \partial f), \quad c_{\varphi ef} = 2\pi f / (\partial\varphi / \partial r). \quad (3)$$

Согласно формулам (1) и (3), в однородном свободном пространстве ЭГС и ЭФС равны друг другу и скорости звука c, и определение (2) приводит к тождеству $\beta_{ef}=1$. Оно же дает возможность найти расстояние r через известную частоту f и измеренные в точке приема значения частных производных $\partial\varphi/\partial f$ и $\partial\varphi/\partial r$, поскольку в левой части (2) – единица.

Но и в волноводе формула (2) – основа для аналогичного измерения расстояния до источника звука, если прием сигналов осуществляется в окрестности тех интерференционных максимумов (ИМА) поля, где ЭГС и ЭФС близки друг к другу, ФЭИ близок к единице. С физической точки зрения в таких ИМА градиент фазы на плоскости «расстояние – частота» имеет те же свойства, что и в однородном свободном пространстве.

Далее приведены результаты компьютерного моделирования значений ФЭИ в глубоком море. Вычисления значений ФЭИ выполнены для разных частот и глубин излучения и приема сигналов, для зимних и летних условий. Показано, что ФЭИ в глубоком море близок к (+1) в окрестности ИМА на всей горизонтальной трассе (зимние условия) или только в ближней и дальних зонах акустической освещенности (летние условия).

1. ФЭИ в глубоком море при зимних условиях.

Рассмотрим амплитудно-фазовые характеристики звукового давления на трассе приема сигнала на одном из глубоководных участков Норвежского моря при зимних условиях. Глубину моря (h=3100 м) и вертикальное распределение скорости звука (ВРСЗ, рис. 1а) считаем не зависящими от расстояния, как и параметры грунта, – скорость звука (c_1=1550 м/с), плотность (ρ_1=1.5 г/см^3), потери в грунте (2.7 дБ на длину волны).

На рис. 1б показаны зависимость амплитуды ЗД от расстояния до источника и вклады мод трех разных типов (водных, захваченных, вытекающих) в общую сумму мод. У водных мод фазовая скорость находится в интервале от минимальной до максимальной скорости звука

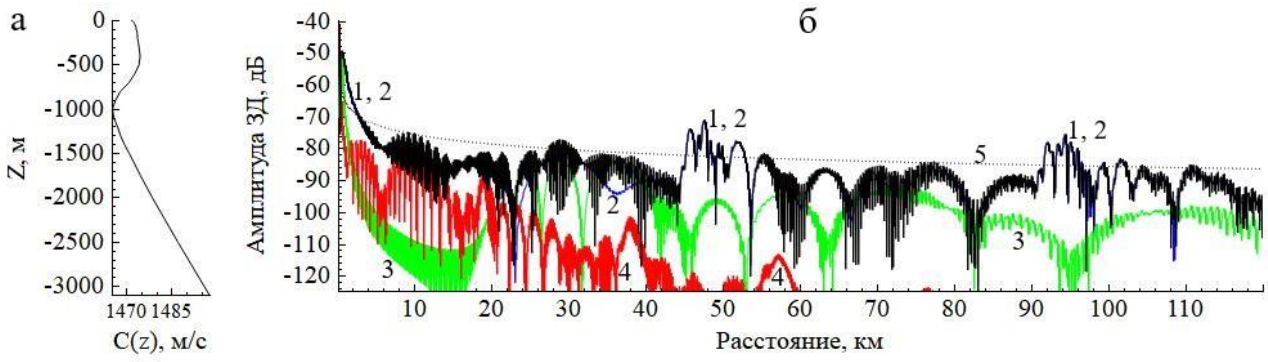


Рис. 1. (а) – ВРСЗ на глубоководном участке Норвежского моря в феврале; (б) – амплитуда звукового давления, дБ (1), водные моды (2), захваченные моды (3), вытекающие моды (4), цилиндрическое спадание (5); f=200 Гц, z_s=10 м, z=120 м.

в воде, у захваченных мод – не выше скорости звука в грунте, у вытекающих мод – больше скорости звука в грунте. Частота – 200 Гц, глубина источника сигнала – z_s=10 м, глубина

приемника – z =120 м. При реальных глубинах подвижных источников и приемников в глубоком море справедливо и далее учтено неравенство $(z_s + z)/2 < h/10$.

На всех расстояниях, в том числе в БЗАО ($r < 8$ км), доминируют водные моды. Первая ДЗАО ($44 < r < 53$ км) и вторая ДЗАО ($91 < r < 103$ км) выражены слабо, так как всюду водные моды приповерхностного звукового канала (ППЗК) «засвечивают» зону тени.

Превалирование водных мод на всей горизонтальной трассе и предопределяет амплитудно-фазовые характеристики звукового поля в зимних условиях. Спадание амплитуды ЗД с расстоянием происходит по цилиндрическому закону, так как водные моды не взаимодействуют с дном. Градиент фазы КО ЗД наиболее устойчив и стабилен в окрестности ИМА, а в минимумах поля величина и направление градиента фазы резко изменяются. С учетом перепада скорости звука в воде от свободной поверхности моря до дна (рис. 1а) угол скольжения вектора градиента фазы КО ЗД θ не должен превышать 10 градусов. Более точно найти угол скольжения вектора градиента фазы КО ЗД θ можно, вычисляя ФЭИ, так как в лучевой асимптотике [1] угол θ и ФЭИ β_{ef} связаны соотношением

$$\theta = \arccos(\sqrt{\beta_{ef}}). \qquad (4)$$

Вычисления ФЭИ при зимних условиях были проведены для разных частот (200, 400, 800 Гц), разных глубин источника (10, 100, 200 м) и приемника (10, 120, 220 м). Всего было смоделировано 18 вариантов сочетаний этих параметров. Результаты, полученные для всех 18 вариантов, показали, что в зимних условиях значения ФЭИ в ИМА устойчивы и очень близки к единице, – находятся в интервале значений 0.98-1.0.

На рис. 2 представлен один из этих вариантов. Показаны амплитуда ЗД, ЭФС, ЭГС и ФЭИ как функции расстояния до источника. Значения ФЭИ умножены на 2000 для совмещения кривых на одном графике. ФЭИ в ИМА попадает в интервал 0.98-1.0. Согласно (4), $\theta \le \arccos(\sqrt{0.98}) = 8^o$, то есть на всей горизонтальной трассе отклонение вектора градиента фазы КО ЗД от горизонтальной плоскости в ИМА не выходит за пределы $\pm 8^o$.

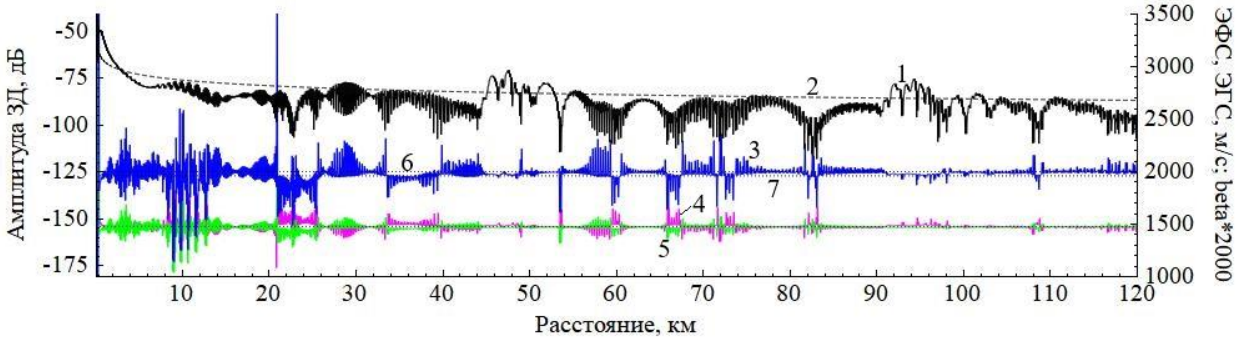


Рис. 2. Амплитуда звукового давления, дБ (1), цилиндрическое спадание (2); $\beta_{ef} \cdot 2000$ (3); ЭФС (4); ЭГС (5); значение $\beta_{ef} = 1$ (6); значение $\beta_{ef} = 0.98$ (7); $f = 200$ Гц, $z_s = 10$ м, $z = 120$ м, $r = 0.1$-120 км, февраль.

2. ФЭИ в глубоком море при летних условиях.

Рассмотрим результаты компьютерного моделирования амплитудно-фазовых характеристик звукового давления на трассе приема сигнала на том же глубоководном участке Норвежского моря при летних условиях.

На рис. 3а показано ВРСЗ при летних условиях, на рис. 3б – зависимость амплитуды звукового давления от расстояния до источника и вклады мод трех разных типов (водных, захваченных, вытекающих) в общую сумму мод на частоте 800 Гц при глубине источника сигнала z_s =200 м и глубине приемника z =220 м.

В БЗАО ($r < 8$ км), а также в первой ДЗАО ($42 < r < 63$ км) и во второй ДЗАО ($88 < r <$ 120 км) доминируют водные моды, в начале зоны тени ($8 < r < 20$ км) – вытекающие моды, на остальных участках трассы – захваченные моды. Водные моды в зоне тени складываются в противофазе и взаимно подавляют друг друга, как и захваченные моды при $r < 20$ км, а вытекающие моды при $r > 20$ км быстро затухают с расстоянием.

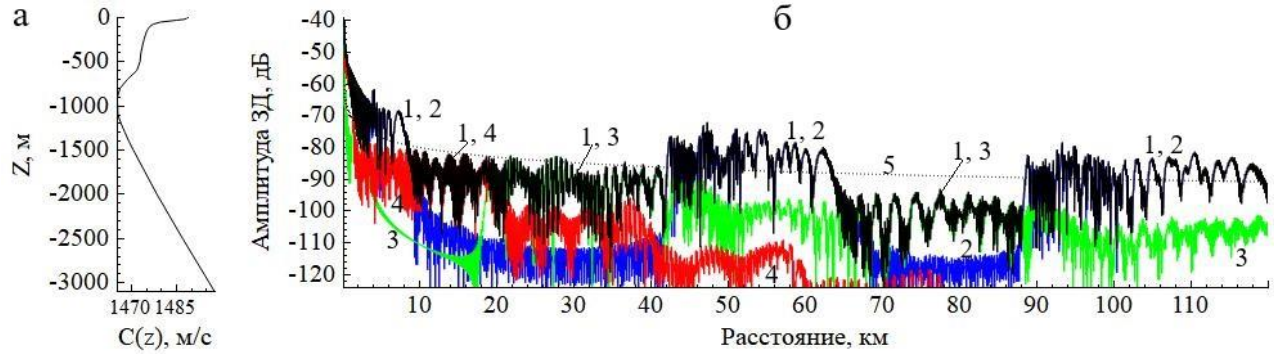


Рис. 3. (а) – ВРСЗ на глубоководном участке Норвежского моря в августе; (б) – амплитуда звукового давления, дБ (1), водные моды (2), захваченные моды (3), вытекающие моды (4), цилиндрическое спадание (5); *f*=800 Гц, z_s=200 м, *z*=220 м.

Превалирующим в БЗАО и ДЗАО водным модам соответствуют лучи с малыми – в пределах $\pm 8^o$ – углами скольжения, поэтому направление градиента фазы КО ЗД в ИМА в этих зонах близко к горизонтальному направлению. Соответственно, ЭГС и ЭФС в ИМА в БЗАО и ДЗАО близки друг к другу, а значения ФЭИ, определяемые выражением (2), близки к единице (рис. 4). С физической точки зрения это значит, что в БЗАО и ДЗАО фазовая структура звукового поля в ИМА аналогична фазовой структуре поля в однородном свободном пространстве.

Для летних условий вычисления ФЭИ тоже были проведены на тех же частотах (200, 400, 800 Гц), при тех же глубинах источника (10, 100, 200 м) и приемника (10, 120, 220 м). Всего было смоделировано 18 вариантов сочетаний этих параметров. Результаты, полученные для всех 18 вариантов, подтверждают, что в летних условиях значения ФЭИ в ИМА устойчивы и очень близки в БЗАО и ДЗАО к единице (попадают в интервал 0.98-1.0).

На рис. 4 представлен один из этих вариантов. Показаны амплитуда ЗД, ЭФС, ЭГС и ФЭИ как функции расстояния до источника. Значения ФЭИ умножены на 2000 для

совмещения кривых на одном графике. В БЗАО и ДЗАО значения ФЭИ в ИМА близки к единице и попадают в интервал 0.98-1.0. В этом интервале значений ФЭИ вектор градиента фазы КО ЗД близок в ИМА к горизонтальному направлению и отклоняется от него в БЗАО и ДЗАО не больше чем на угол $\theta \le \arccos(\sqrt{0.98})$ – в пределах $\pm 8^o$.

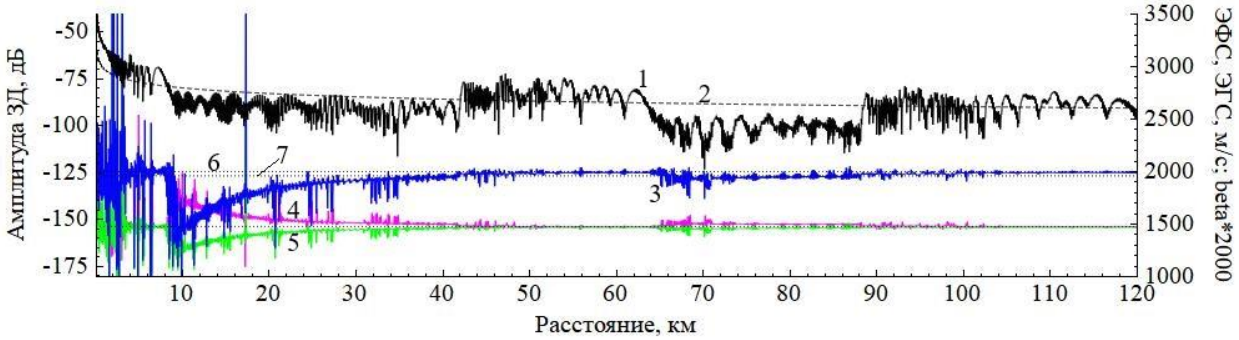


Рис. 4. Амплитуда звукового давления, дБ (1), цилиндрическое спадание (2); $\beta_{ef} \cdot 2000$ (3); ЭФС (4); ЭГС (5); значение $\beta_{ef} = 1$ (6); значение $\beta_{ef} = 0.98$ (7); $f = 800$ Гц, $z_s = 200$ м, $z = 220$ м, $r = 0.1$-120 км, август.

Но в зоне тени значения ФЭИ β_{ef} могут быть значительно меньше единицы. В начале зоны тени, где доминируют вытекающие моды и крутые лучи, отклонение θ вектора градиента фазы КО ЗД от горизонтального направления определяется [1] в ИМА выражением $\theta \approx \pm \arccos[1/\sqrt{1+(2h/r)^2}]$ и при $r = 2h/\sqrt{3}$ составляет $\theta \approx \pm 60^o$, а $\beta_{ef} \approx 1/4$.

Выводы

В зимних условиях на всей горизонтальной трассе превалируют водные моды, поэтому спадание амплитуды ЗД с расстоянием происходит по цилиндрическому закону, отклонение градиента фазы КО ЗД от горизонтального направления в окрестности ИМА не превышает $\pm 8^o$, ФЭИ близок к «+1» и попадает в интервал 0.98-1.0.

В летних условиях ФЭИ попадает в интервал 0.98-1.0 только в БЗАО и ДЗАО. В зоне тени, где доминируют сначала вытекающие моды, затем – захваченные моды, ФЭИ значительно меньше единицы, а отклонение градиента фазы КО от горизонтального направления может превышать $\pm 60^o$. В зоне тени ФЭИ – функция расстояния до источника.

Список литературы

1. *Аксенов С.П., Кузнецов Г.Н.* Интерференционные инварианты в максимумах гидроакустического поля в глубоком море // Акуст. журн. 2024. 70, 1, с. 65. DOI: 10.31857/S0320791924010099
2. *Aksenov, S.P., Kuznetsov, G.N.* On the Possibility of Coherent Addition of Low-Frequency Multiharmonic Communication Signals in the Deep Sea. // Phys. Wave Phen. 2022. **30**, 1, p. 56. https://doi.org/10.3103/S1541308X22010022

УДК: 004.85+004.032.26+004.93 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39463

Анализ современных архитектур нейронных сетей для задач классификации объектов речного судоходства

А.С. Поляков[1,a], Р.В. Травин[1,b]

[1]*Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИПФ РАН). Нижний Новгород 603950, ул. Ульянова, 46.*

E-mail: [a]a.polyakov@ipfran.ru, [b]r.travin@ipfran.ru

Аннотация: Определение источников звука по временной реализации сигнала является актуальной задачей для различных практических применений, начиная от распознавания речи до диагностики вибрационных дефектов. В условиях бурного роста объема данных задача автоматической классификации различных источников звука становится особенно востребованной. В настоящее время наиболее распространённым является нейро-сетевой подход, который способен находить сложные, нелинейные зависимости в данных, превосходя по точности и эффективности классические алгоритмы. При этом не все сети одинаково эффективны для разных типов данных и условий. Представленные для анализа современные архитектуры предобученных нейронных сетей – сверточная нейронная сеть с механизмом внимания, а также визуальный трансформер с механизмом самовнимания, представляющий собой адаптацию больших языковых моделей – позволяют в дальнейшем оценить их адаптивность к заданным наборам данных и выбрать/создать оптимальную архитектуру для обучения. Приведена апробация работы сетей и представлены результаты на собранных нами экспериментальных данных речного судоходства.

Ключевые слова: нейронные сети, классификация звуковых сигналов, обработка акустических сигналов, сверточные, предобучение.

Analysis of modern neural network architectures for river navigation object classification problems

A.S. Polyakov[1,a], R.V. Travin[1,b]

[1]*Federal Research Center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences (IAP RAS). Nizhny Novgorod 603950, Russia, 46 Ul'yanov Street.*

E-mail: [a]a.polyakov@ipfran.ru, [b]r.travin@ipfran.ru

Abstract: Identifying sound sources based on the temporal distribution of the signal is a pressing problem for a variety of practical applications, ranging from speech recognition to vibration defect

diagnostics. With the rapid growth of data volumes, the task of automatically classifying various sound sources is becoming especially relevant. Currently, the most widely used approach is a neural network, which is capable of identifying complex, nonlinear relationships in data, surpassing classical algorithms in accuracy and efficiency. However, not all networks are equally effective for different data types and conditions. The modern architectures of pretrained neural networks presented for analysis – a convolutional neural network with an attention mechanism and a visual transformer with a self-attention mechanism, which is an adaptation of large language models – allow for further evaluation of their adaptability to given datasets and the selection/creation of the optimal architecture for training. A test run of the networks is presented, along with the results using experimental river navigation data collected by us.

Keywords: neural networks, classification of sound signals, acoustic signal processing, convolutional, pretraining.

PACS: 07.05.Mh + 43.60.-c

Введение

Определение типов источников звука по временной реализации сигнала является актуальной задачей для различных практических применений – от распознавания речи до диагностики вибрационных дефектов. С ростом вычислительных мощностей графических процессоров задача автоматической классификации источников звука становится особенно востребованной. Наиболее распространённым является нейросетевой подход, способный находить сложные, нелинейные зависимости в данных, превосходя классические алгоритмы по точности и эффективности. Для классификации аудиосигналов, не относящихся к речевым, широко используются сверточные нейронные сети, трансформеры и их гибриды. Проведение анализа для выявления сильных и слабых сторон различных нейросетевых архитектур является важным этапом для обоснованного выбора модели, обеспечивающей наилучшее соотношение точности, эффективности вычислений и устойчивости к многообразию входных данных. Результаты такого анализа позволяют сопоставить основные метрики работоспособности моделей, а также оценить скорость обучения и работы, устойчивость к шумам и требуемый объем обучающей выборки.

1 Предобработка данных

Сбор экспериментальных данных производился с использованием направленного приемника звука – микрофона, расположенного в фокальной плоскости параболического рефлектора. Эксперимент проводился в акватории р. Волга в Нижегородской области, формировалась. Записи аудиосигналов производились в непрерывном режиме с частотой дискретизации 48 кГц для различных траекторий и расстояний до объекта исследования. В записях присутствовали посторонние звуки, такие как ветер, щебетание птиц и другие

различные техногенные шумы [1]. В качестве входных данных использовалась лог-мел-спектрограмма, полученная путем обработки спектра мощности мел-фильтрами. Лог-мел-спектрограмма чаще всего применяется для классификации аудиосигналов ввиду того, что она приближена к реальной работе человеческого уха и модели лучше выделяют значимые для распознавания признаки. Данные прошли стадию предобработки перед подачей в модель: произведена фильтрация для обрезания шумов и удаления ненужной информации в полосе частот от 60 до 6000 Гц, ввиду малого обучающего датасета использована аугментация (искуственное расширение набора данных для улучшения обучения модели).

В работе представлены модели, предобученные на датасете ImageNet-1K – крупной базе изображений, содержащей около 1.2 млн снимков, распределенных по 1000 категориям. Модели, предобученные на ImageNet-1K, эффективно распознают простые геометрические фигуры, линии и градиенты. Предобучение на таком объеме данных обеспечивает высокое качество извлечения признаков, улучшенную устойчивость модели к переобучению и позволяет эффективно дообучать модели на небольших целевых наборах данных. Для использования данных моделей с дообучением проведена нормализация и корректировка размеров изображений в соответствии с требованиями к входным данным предобученных на ImageNet-1K моделей. Обучение производилось для 3-х классов аудиосигналов: катер, баржа и фон (отсутствие сигнала). Разметка файлов выполнялась посекундно, разметка служит целевыми метками для обучения модели. При необходимости проводилось ресемплирование – изменение частоты дискретизации сигнала.

2 Сверточная нейронная сеть на аудиоданных

2.1 Описание сети

Сверточная нейронная сеть (СНС) состоит из чередующихся сверточных и субдискретизирующих слоев, которые используются для извлечения карты признаков, подаваемых впоследствии на полносвязанную сеть прямого распространения. Базовая архитектура СНС описана в работе [2]. Их преимущество – в способности хорошо выделять локальные признаки. Однако есть важный недостаток – локальность: чтобы увидеть взаимосвязи между далекими частями изображения, требуется много слоев. Появление механизмов внимания стало одной из успешных попыток решения данной проблемы.

В данной работе использовалась популярная СНС ConvNeXt с архитектурой, представленной в [3]. ConvNeXt – модернизированная архитектура СНС ResNet-50 [4] с применением подходов, характерных для трансформеров. Дополнительно в сеть был добавлен механизм внимания – способность модели динамически, выделять важную информацию в процессе обучения, игнорируя несущественную.

2.2 Результаты работы сети

Работоспособность модели проверяется на множестве метрик, однако можно выделить некоторые основополагающие. В данном случае особое внимание уделим метрике производительности – матрице предсказаний, предоставляющей собой средство оценки корректности решения задачи классификации и мест возникновения ошибок, и метрике площади под так называемой ROC-кривой (ROC-AUC) – графиком, отображающим соотношения между чувствительностью модели и вероятностью ложного срабатывания. ROC-AUC определяется как значение площади под ROC-кривой, построенной на незнакомых данных для модели. Матрица предсказаний строилась от тестовой выборки – данных, не используемых при обучении модели.

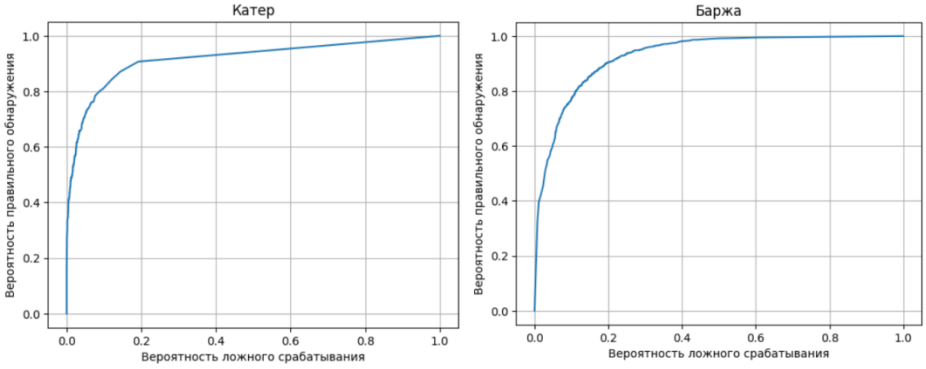
Обучение производилось на 39 эпохах обучения – полных циклов обучения нейронной сети всеми обучающими данными при гиперпараметре скорости обучения (learning rate) в 10^{-5}. Данные аугментировались около 10 раз с добавлением гауссова шума, имитации доплеровского сдвига и удаленности движущихся объектов. Часть слоев основной модели, помимо выходных слоев, размораживались (суммарно около 5 млн параметров для обучения). Модель достигла точности (метрика acc при обучении) вплоть до 94. На рис. 1 отображена матрица предсказаний работы модели для 3-х классов. Строки матрицы представляют количество фрагментов, принадлежащих определенному классу, столбцы – прогноз модели для тестовой выборки. Фактически на главной диагонали представлено количество правильно предсказанных фрагментов.



Рис. 1. Матрица предсказаний СНС ConvNeXt на аудиоданных

В данном случае метка 2 обозначает катер, 1 – баржа и 0 – фон. Для катера точность, показывающая, какая доля выделенных объектов, действительно являются положительными (precision) составила 99%, для баржи – 91%. При этом полнота (recall) – метрика, показывающая какая доля положительных объектов была правильно идентифицирована моделью – для катера 91% и 93% для баржи. Модель демонстрирует высокое качество классификации для обоих объектов. Общая точность составила 94%, что демонстрирует высокую степень точности модели на тестовой выборке. Точность катера оказывается выше

ввиду яркой выраженности спектра. Для катера приоритет модели смещен в сторону минимизации ложных срабатываний, в то время как для баржи акцент больше на минимизации пропусков. Метрика ROC-AUC для целевых сигналов представлена на рис. 2.



а *б*

Рис. 2. ROC-кривая катера (*а*) и баржи (*б*) СНС ConvNeXt на аудиоданных

Результаты значений ROC-AUC составили 0.92 для катера и 0.93 для баржи соответственно. Это говорит о том, что модель обладает высокой обобщающей способностью и уверенностью в сделанных предсказаниях. То, что значение ROC-AUC все же выше для баржи связано с дисбалансом классов, но это свидетельствует и о том, что модель научилась распознавать класс, даже не смотря на низкочастотный диапазон сигнала и его возможную схожесть с шумовыми значениями на изображении (отсутствием сигнала).

3 Трансформер на аудиоданных

3.1 Описание сети

Визуальные трансформеры – это модели глубокого обучения с механизмом многоголового самовнимания [5, 6]. Трансформеры имеют видоизмененную структуру в отличие от СНС. Ключевое нововведение – механизм самовнимания, позволяющий адаптивно регулировать степень внимания к различным частям входных данных с помощью весовых коэффициентов. Основные преимущества трансформеров – параллельная обработка всех элементов изображения и эффективное моделирование связей между удаленными частями. В работе рассматривается предобученный на ImageNet-1K трансформер ViT [6]. Адаптация ViT к целевым наборам данных позволяет оценить эффективность механизма самовнимания в сравнении со СНС.

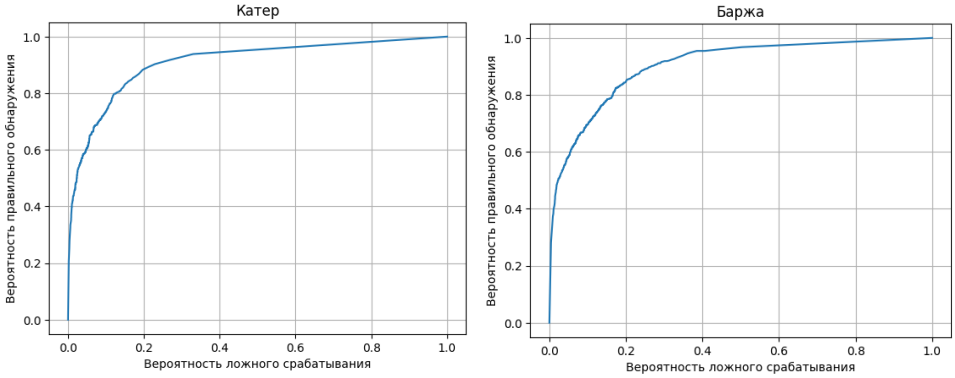
3.2 Результаты работы сети

Модель обучалась на 100 эпохах при learning rate в 10^{-5} при разморозке нескольких начальных слоев архитектуры (суммарно около 5 млн параметров вместе с выходным слоем). Проведенная предобработка аналогична ConvNeXt за исключением обязательного ресемплирования для корректной работы предобученной модели. Метрика точности достигла значения около 95. Матрица предсказаний представлена рис. 3.



Рис. 3. Матрица предсказаний трансформера ViT на аудиоданных

Для катера точность precision составляет 95%, для баржи – 92%. При этом recall – для катера 93% и 92% для баржи. Модель также демонстрирует высокое качество классификации для обоих объектов. Общая точность идентично ConvNext составила 94% и говорит о том, что на тестовой выборке модель также отлично смогла классифицировать целевые сигналы с некоторыми изменениями в значениях метрик. Уклон модели уже больше в минимизацию пропусков катера, а для баржи выше минимизация моделью ложных срабатываний. ROC-кривые целевых сигналов показаны на рис. 4.



а *б*

Рис. 4. ROC-кривая катера (*а*) и баржи (*б*) трансформера ViT на аудиоданных

Результаты значений ROC-AUC (0.91 для катера и 0.90 для баржи) оказываются ниже, чем у предыдущей сети. Связано это в первую очередь с размером датасета, хоть механизм самовнимания позволяет лучше различать дальние зависимости, но он не имеет встроенного понимания структуры изображения [6]. На небольших датасетах ViT более склонен (в сравнении с СНС) к переобучению, так как не имеет стартовой информации о связи рядом расположенных пикселей изображения.

Заключение

Обе сети продемонстрировали хорошие результаты, что свидетельствует о потенциальной применимости полученных моделей на практике в задачах акустики. Стоит отметить, что различение локальных паттернов на небольших датасетах в большей степени свойственно СНС в силу их архитектурной особенности – обработки соседних пикселей

ядрами свертки, что в условиях ограниченного объема обучающей выборки позволяет более эффективно выделять локальные признаки и снижает риск переобучения по сравнению с трансформерами. Механизм самовнимания, реализованный в ViT, вносит вклад в процесс обучения, позволив достичь сопоставимых результатов с СНС. Однако в условиях относительно сильной зашумленности сигналов и схожести спектральных характеристик баржи с низкочастотными шумами наличие механизма самовнимания не обеспечило существенного прироста эффективности по сравнению с сверточной архитектурой. Основной вклад внесли выбор архитектуры сети и состав обучающей выборки. Дальнейшей развитие работы требует расширения числа классов, введения дополнительных признаков и доработки модели с целью улучшения обобщающей способности (возможности ее работы на незнакомых данных), что в перспективе позволит автоматизировать процесс классификации.

Список литературы

1. *Костеев Д.А., Львов А.В., Поляков А.С., Салин М.Б., Травин. Р.В.* Экспериментальная апробация алгоритма классификации гидроакустических сигналов с применением машинного обучения и мультитейперного анализа на примере речного судоходства // Гидроакустика. 2025. **61**, № 1. С. 53-65.

2. *LeCun, Y., Bottou L., Bengio Y., and Haffner P.* Gradient-based learning applied to document recognition // Proceedings of the IEEE. 1998. **86**. P. 2278-2324. http://doi.org/10.1109/5.726791

3. *Liu Z., Mao H., Wu C., Feichtenhofer C., Darrell T., Xie S.* A ConvNet for the 2020s // arXiv preprint. arXiv:2201.03545.

4. *He K., Zhang X., Ren S., Sun J.* Deep Residual Learning for Image Recognition // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2016. P. 770-778.

5. *Vaswani A., Shazeer N., Parmar N., Uszkoreit J., Jones L., Gomez A.N., Kaiser Ł., Polosukhin I.* Attention is All you Need // 31st Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS). Advances in Neural Information Processing Systems. 2017. **30**. Curran Associates, Inc. arXiv:1706.03762.

6. *Dosottskiy A., Beyer L., Kolesnikov A., Weissenborn D., Zhai X., Unterthinner T., Dehghani M., Minderer M., Heigold G., Gelly S., Uszkoreit J., Houlsby N.* An Image is worth 16x16 words: Transformers for Image Recognition at Scale //arXiv preprint. arXiv:2010.11929.

УДК: 534-14 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39464

Статистический подход к оцениванию координат удаленного акустического источника в канале мелкого море

А.И. Малеханов[a], А.В. Смирнов[b]

Федеральный исследовательский центр «Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук», 603950 Н. Новгород, ул. Ульянова, 46

E-mail : [a]almal@ipfran.ru, [b]lexsmial@ipfran.ru

Аннотация: Впервые выполнено статистическое моделирование функционала оценки пространственных и угловых координат удаленного точечного источника в плоскослоистом случайно-неоднородном канале мелкого моря на фоне океанических шумов и/или интенсивной помехи. В рамках модового формализма предложена эвристическая модель принимаемых сигналов, которая учитывает случайную фазовую модуляцию мод в канале, дисперсия которой параметрически зависит от дистанции. Получены количественные оценки влияния статистических эффектов распространения на качество локализации источника полезного сигнала с использованием вертикальной и горизонтальной антенных решеток.

Ключевые слова: мелкое море, локализация источника, оценка координат, функция неопределенности, антенная решетка, пространственное и угловое разрешение.

Statistical approach to estimation of the remote acoustic source coordinates in a shallow sea channel

A.I. Malekhanov[a], A.V. Smirnov[b]

Federal Research Center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences. 46 Ul'yanov Street, Nizhny Novgorod, 603950, Russia

E-mail : [a]almal@ipfran.ru, [b]lexsmial@ipfran.ru

Abstract: For a first time, a statistical approach to the acoustic source localization problem in a random-inhomogeneous shallow water channel is realized, taking also into account the ambient sea noise and/or intense interference from a point source. A heuristic signal model is exploited, which is based on long-range random phase modulation of the normal modes in a channel. The statistical effects on the source localization by the use of both vertical and horizontal arrays are presented.

Keywords: shallow water, coordinate estimation by uncertainty function, cross-modal correlations, antenna array

PACS: 43.60.−c; 43.30.+m.

Введение

Задача локализации удаленного источника сигнала в подводном канале распространения представляет собой часть общей задачи обнаружения и оценки неизвестных параметров гидроакустических сигналов на фоне шумов морской среды и дополнительных помех. Локализация источника потенциально может быть решена с использованием протяженной антенной решетки (АР) при условии, что пространственные спектры полезного сигнала и совокупных шумов и помех имеют достаточные для этого различия друг относительно друга. В рамках модового формализма возможность и достилаемые характеристики локализации источника в вертикальной плоскости (по дальности и глубине) определяются зависимостями фазовых набегов отдельных мод от расстояния до источника и коэффициентов возбуждения мод, определяемых его глубиной, соответственно. Локализация источника по угловой координате в горизонтальной плоскости канала также основана на учете дискретного характера межмодовых фазовых сдвигов из-за дискретизации продольных волновых чисел мод. Следовательно, модовый подход к описанию принимаемых сигналов дает возможность анализа эффективности методов локализации их источников по всем трем координатам, что ранее было использовано многими авторами в рамках концепции т.н. согласованной со средой обработки сигналов (matched-field processing) (см., например, [1]).

Однако концепция «согласования» принципиально ограничена сценарием приема сигналов в регулярном канале, в то время как «накапливаемые» с дистанцией случайные флуктуации фазовых набегов отдельных мод в случайно-неоднородном канале должны приводить к потерям качества локализации. Дополнительным осложняющим фактором является возможное присутствие интенсивной помехи от другого источника, сигнал которого также испытывает влияние статистических эффектов распространения. Несмотря на большое число публикаций по задаче локализации источников звука в подводных каналах, включая публикации по локализации с применением технологий машинного обучения, работы в обозначенной статистической постановке, позволяющей корректно учесть и количественно оценить влияние указанных факторов реального ослабления качества локализации удаленных источников, нам не известны.

1 Постановка задачи и основные положения

Применительно к случайно-неоднородному подводному каналу, сигнал удаленного точечного источника на входе АР мы представляем в виде суперпозиции отдельных мод со случайными амплитудами:

$$\tilde{s}_p = \tilde{s}\left(r_p, z_p\right) = \sum_{m=1}^{M} \tilde{a}_m\left(r_p, z_{\mathrm{S}}\right) u_m\left(z_p\right), \qquad (1)$$

$$\tilde{a}_m\left(r_p, z_S\right) = u_m\left(z_S\right) e^{ih_m r_p + i\tilde{\varphi}_m\left(r_p\right)} e^{-\alpha_m r_p} \frac{1}{H\sqrt{h_m r_p}}. \quad (2)$$

Здесь $u_m(z)$ и h_m – модовые функции по глубине и продольные волновые числа мод регулярного канала; M – полное число мод дискретного спектра; α_m – коэффициенты затухания мод; $\tilde{\varphi}_m\left(r_p\right)$ – случайные фазовые флуктуации мод (с нулевым средним значением); r_p и z_S – расстояние от элемента АР до источника и глубина источника, соответственно; z_p – глубины элементов АР, p = 1,…, N – номера элементов АР. В случае вертикальной АР (ВАР) $r_p = r_S$, где r_S – расстояние от центра АР до источника; а для горизонтальной АР (ГАР) $r_p = \sqrt{\left(r_S \cos\theta_S\right)^2 + \left(r_S \sin\theta_S - x_p\right)^2}$, где θ_S – угол на источник сигнала в горизонтальной плоскости, а x_p – координата элемента ГАР относительно ее центра.

Согласно (1), (2), применяемая нами эвристическая модель случайного частично-когерентного многомодового сигнала отдельного удаленного источника на входе АР основана на предположении, что фазовые набеги распространяющихся мод испытывают случайную фазовую модуляцию, дисперсия которой растет с ростом дистанции. Это следует из известных результатов статистической модовой теории распространения звука в подводных каналах, учитывающей многократное рассеяние сигнальных мод на случайных неоднородностях среды. Будем предполагать, что среднеквадратичное отклонение σ_m фазовых флуктуаций $\tilde{\varphi}_m\left(r\right)$ растет линейно с ростом дистанции от 0 до π при условии, что скорость роста зависит от номера моды: для первой моды максимум достигается на некотором расстоянии r_1, которое значительно (на порядок) больше, чем аналогичное расстояние r_M для моды с номером M, что также характерно для реальных каналов. Конкретно, параметрическая модель зависимости σ_m от дистанции задается нами в виде:

$$\sigma_m\left(r\right) = \begin{cases} \pi \dfrac{r}{r_m} & , r < r_m \\ \pi & , r \geq r_m \end{cases}, \text{ где } r_m = \frac{r_{m-1} - \mathrm{tg}\left(\delta\alpha\right)}{1 + r_{m-1}\mathrm{tg}\left(\delta\alpha\right)}, \ \delta\alpha = \frac{1}{M-1}\mathrm{arctg}\frac{r_1 - r_M}{r_1 r_M + 1} \quad (3)$$

При численном моделировании мы задаем следующие значения параметров модели: r_1 = 50 км, r_M =10 км, для остальных мод – расстояния r_m из этого интервала при условии, что угол наклона соответствующих прямых меняется на равную величину $\delta\alpha$ для соседних мод.

Стандартная процедура локализации (оценивания координат) источника основана на выборе априори известной модели канала и области поиска на координатной сетке (r_i, z_j, θ_q) пробных значений дальности и глубины (для ВАР) или угла пеленга и дальности (для ГАР), расчете массива пробных реализаций сигнала на входе АР и последующей их подстановке в

функционал локализации определенного вида, который зависит от выбранного метода пространственной обработки сигналов. Пробный сигнал $\hat{s}_p$ на каждом элементе АР имеет вид (1), где в качестве модовых амплитуд $\hat{a}_m\left(r_i, z_j\right)$ фигурируют детерминированные их оценки, рассчитанные для всех узлов координатной сетки. Функция неопределенности (ФН) координат источника имеет в общем случае вид:

$$F = \mathbf{w}^{+}\mathbf{A}\mathbf{w}, \tag{4}$$

где $\mathbf{A}$ — матрица пространственной обработки входных сигналов; $\mathbf{w} = \hat{\mathbf{s}}^{*}$ – весовой вектор АР, отвечающий каждой пробной реплике полезного сигнала.

В случае приема полезного сигнала на фоне пространственно-белого шума матрица $\mathbf{A}$ имеет вид: $\mathbf{A} = \tilde{\mathbf{R}}_{\mathrm{S}} + \mathbf{I}$, где $\tilde{\mathbf{R}}_{\mathrm{S}} = \left\langle \tilde{\mathbf{s}}^{*}\tilde{\mathbf{s}}^{\mathrm{T}} \right\rangle$ – матрица пространственных корреляций (когерентности) сигнала, $\mathbf{I}$ – единичная матрица когерентности шума единичной интенсивности на элементах АР (предполагается нормировка интенсивности всех модовых сигналов на интенсивность шума). Фактически, ФН (4) есть обобщение функционала согласованной обработки на случай частично-когерентного сигнала. С учетом «небелых» модовых шумов и помехи, которые в совокупности «маскируют» полезный сигнал, в качестве матрицы обработки естественно выбрать матрицу обработки, оптимальной по критерию максимума выходного отношения сигнал/(шум + помеха). Такая матрица имеет известный вид: $\mathbf{A}_{\mathrm{opt}} = \left(\mathbf{R}_{\mathrm{N}} + \mathbf{I}\right)^{-1}\tilde{\mathbf{R}}_{\mathrm{S}}\left(\mathbf{R}_{\mathrm{N}} + \mathbf{I}\right)^{-1}$, где $\mathbf{R}_{\mathrm{N}} = \left\langle \mathbf{n}^{*}\mathbf{n}^{\mathrm{T}} \right\rangle$ – матрица когерентности совокупных модовых шумов и помех (см. [2] и цитируемую там литературу). Известно также, что в случае слабого сигнала такая обработка является асимптотически оптимальной по критерию максимума отношения правдоподобия (при гауссовых статистиках всех принимаемых сигналов). Следовательно, при таком подходе мы можем говорить о совместном решении задачи обнаружения/оценки координат источника полезного сигнала, используя для этого один и тот же метод обработки сигналов (процессор АР).

Таким образом, моделирование локализации источника заключается в расчете ФН (4) в области параметров, определяющих специфику задачи: координат источников сигнала и помехи, их интенсивностей на входе АР, параметров статистической модели фазовых флуктуаций отдельных мод, формирующих принимаемые сигналы.

2 Результаты моделирования

Моделирование выполнено для канала Баренцева моря глубиной 200 м с типичным летней гидрологией (использованы данные из базы ЕСИМО http://portal.esimo.ru/portal/). Параметры дна отвечают данным измерений в том же районе: скорость звука 1575 м/с,

плотность 1650 кг/м^3, коэффициент поглощения 0.3 дБ/км×Гц. Положение АР задано таким образом, что ВАР размещена под слоем градиентного скачка профиля, а ГАР установлена вблизи дна на глубине z_p = 190 м. При этом ВАР состоит из N=16 элементов с межэлементным расстоянием $d = \lambda$ = 6 м для заданной частоты 240 Гц, а ГАР имеет 64 элемента с межэлементным расстоянием $d = \lambda/2$ = 3 м. Полное число мод для данной частоты равно M = 25. Источник полезного сигнала задан на глубине z_S = 80 м, подповерхностный источник помехи (имитирующий надводное судно) – на глубине z_N = 10 м.

Приведем сначала оценки координат источника по дальности и глубине с помощью ВАР. На рис. 1 показаны примеры ФН в отсутствие модовой помехи, т.е. для приема сигнала на фоне только белого шума, входное ОСШ = 10 дБ. Видно, что метод согласованной обработки уверенно локализует сигнал без смещений по дальности и глубине, но только при условии слабых фазовых флуктуаций сигнальных мод, что отвечает дистанциям в пределах ~10 км (при выбранных нами параметрах модели). С ростом дистанции дисперсия оценки координат монотонно растет, при этом точность локализации по дальности ухудшается значительно быстрее, чем по глубине (разрезы ФН в области главного максимума приведены в докладе). Так, источник локализуется по глубине с ошибкой ~10 м, а по дальности – с ошибкой ~200 м на расстояниях 20 км. Рост уровня боковых лепестков ФН с ростом расстояния указывает на появление ложных оценок координат, что, наравне с потерями разрешающей способности по главному максимуму ФН, указывает на потери качества локализации.

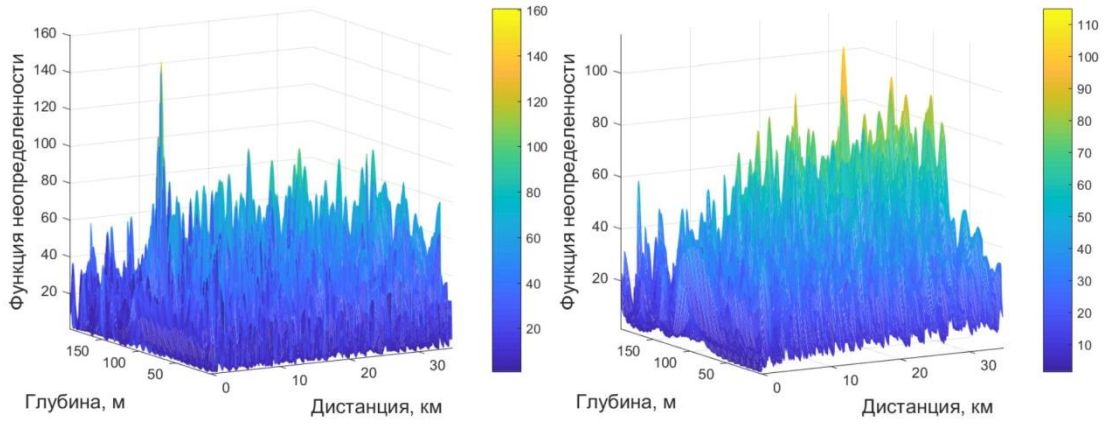


Рис. 1. ФН оценки координат источника сигнала (z_S = 80 м) на фоне белого шума на различных расстояниях: r_S = 1 км (слева), r_S = 20 км (справа).

Расчеты ФН в случае приема сигнала на фоне белого шума и интенсивной помехи, входной уровень которой к сигналу составляет 10 дБ, показывают существенно иные результаты. Метод согласованной обработки радикально теряет свою эффективность в такой ситуации и дает оценку координат источника помехи, но не сигнала (графики приведены в докладе). В то же время, оптимальная обработка с подавлением помехи позволяет уверенно локализовать источник сигнала на ее фоне, но только если расстояние до источника помехи

не слишком велико (пример показан на рис. 2). С удалением источника, помеха становится слабо когерентной, что приводит к резкому ослаблению эффективности ее подавления и, соответственно, к потере качества локализации слабого сигнального источника. Аналогичная динамика прослеживается для зависимости выигрыша АР от расстояния: согласованная обработка, «настроенная» на положение источника полезного сигнала, показывает падение с уровня 18 дБ до 10 дБ, в то время как оптимальная обработка теряет примерно те же 9 дБ, но на уровне более высоких значений – с 31 дБ до 22 дБ.

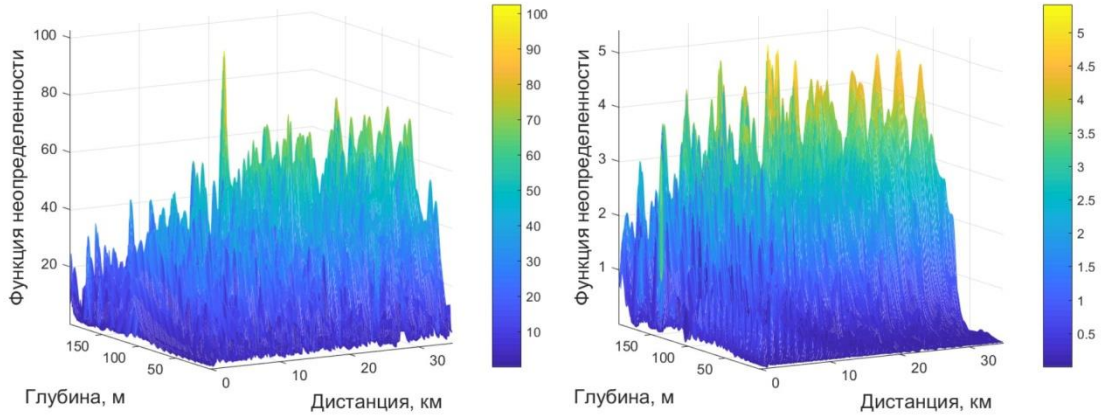


Рис. 2. ФН оценки координат источника сигнала (z_S=80 м, r_S=10 км) на фоне белого шума и интенсивной помехи (z_N=10 м) на различных расстояниях от ее источника: r_N=1 км (слева), r_N=20 км (справа).

Локализация источника по углу прихода путем построения ФН по угловой координате с помощью ГАР имеет свою специфику, которая видна на рис. 3.

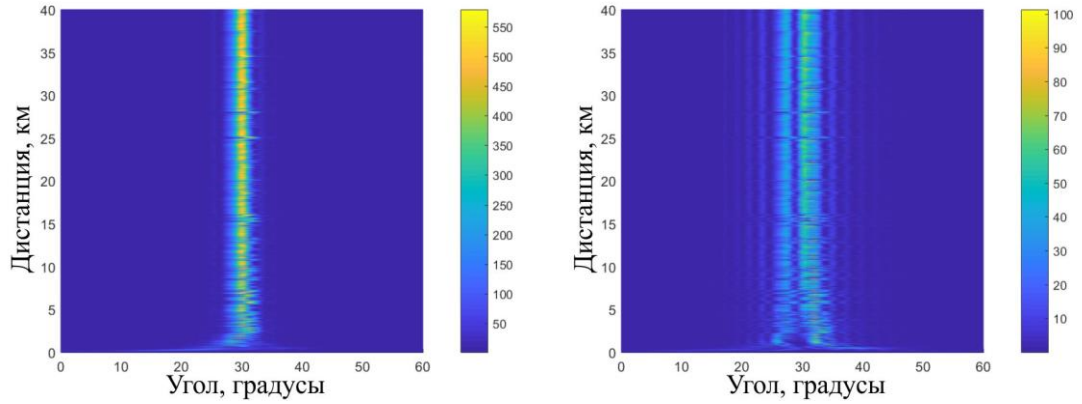


Рис. 3. ФН оценки координат источника сигнала в горизонтальной плоскости (z_S = 80 м, r_S = 10 км, θ_S = 30°) на фоне белого шума (слева) и интенсивной помехи (справа), где координаты ее источника: z_N = 10 м, r_N = 1 км, θ_N = 30°.

Во-первых, оценка расстояния для заданных размеров АР не представляется возможной – максимум ФН не формируется, уровень ФН остается практически постоянным. Во-вторых, оценка угла прихода определяется не только разрешающей способностью АР, но и характерным смещением пеленга от истинного угла прихода (если этот угол ненулевой) [3]. В-третьих, случайные флуктуации модовых фазовых набегов дополнительно приводят к искажениям ФН – к «расплыванию» углов прихода отдельных сигнальных мод и тем самым к ослаблению разрешающей способности. Однако, ФН позволяет оценить угловое

положение источника как в случае приема только сигнала на фоне белого шума методом согласованной обработки, так и в случае приема сигнала на фоне интенсивной помехи с использованием оптимальной обработки. Справа на рис. 3 продемонстрирован случай, когда угловые положения источников сигнала и помехи одинаковые, но полезный сигнал имеет меньший масштаб когерентности в сравнении с сигналом помехи вследствие большего расстояния до источника. С удалением источника помехи, эффективность ее подавления падает (как и в случае ВАР), и оценка пеленга будет все дальше смещаться от истинного направления на источник сигнала.

Заключение

Показано, что ослабление когерентности многомодового сигнала на входе приемной АР в случайно-неоднородном канале, обусловленное случайными фазовыми флуктуациями энергонесущих сигнальных мод, сильно влияет на качество оценки координат его источника. Присутствие интенсивной модовой помехи также является фактором, существенно ограничивающим возможности локализации даже при сильных различиях координат источников полезного сигнала и помехи, когда в регулярном канале может быть достигнуто высокое качество локализации. Количество элементов ВАР и их положение в канале существенно влияют на достигаемое качество локализации по дальности и глубине, при этом оценка глубины источника достигается с более высоким разрешением. Оценка расстояния до источника сильно зависит от целого ряда независимых факторов: от взаимного расположения источников сигнала и помехи, отношения их интенсивностей на входе АР, скорости роста фазовых флуктуаций мод с дистанцией (физически, от интенсивности флуктуаций среды распространения).

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН (темы №№ FFUF-2024-0035, FFUF-2025-0005).

Список литературы

1. *Сазонтов А.Г., Малеханов А.И.* Согласованная пространственная обработка сигналов в подводных звуковых каналах (обзор) // Акуст. журн. 2015. **61**, № 2. С. 233.
2. *Малеханов А.И., Смирнов А.В.* Квазиоптимальные методы пространственной обработки частично когерентных сигналов в многомодовых волноводах // Изв. вузов. Радиофизика. 2024. **67**, № 10. С. 847.
3. *Малеханов А.И., Смирнов А.В.* Моделирование пространственной когерентности многомодового сигнала и отклика горизонтальной антенны в случайно-неоднородном океаническом волноводе // Изв. вузов. Радиофизика. 2022. **65**, № 1. С. 46.

УДК: 681.883.45 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39465

Влияние уровня детализации дна на погрешность оценки характеристик гидроакустического сигнала методом нормальных мод в неоднородном по дальности волноводе

Д.А. Тарасов, Е.Д. Горелик, В.Н. Линник, О.М., Алексеева, А.А. Скорынин

АО «Корпорация «Комета», Москва, Россия

E-mail: tarasov.d.a.2001@yandex.ru

Аннотация: Распространение гидроакустического сигнала во многом определяется свойствами среды и характеристиками дна. Учет реального рельефа дна в методе нормальных мод, который применяется при расчетах дальности доведения сигнала на низких частотах, является ресурсоемкой вычислительной задачей, которая может быть решена путем аппроксимации реального рельефа дна набором сегментов с различной постоянной глубиной. В настоящей работе рассматривается влияние количества сегментов аппроксимации трассы на время проведения и погрешность вычислений.

Ключевые слова: метод нормальных мод, аппроксимация рельефа дна

Influence of the bottom level on the error in estimating the characteristics of a hydroacoustic signal using the normal mode method in a waveguide that is heterogeneous in rangE

D.A. Tarasov, E.D. Gorelik, V.N. Linnik, O.M. Alexeeva, A.A. Skorynin

JSC «Corporation «Kometa», Moscow, Russia

E-mail: tarasov.d.a.2001@yandex.ru

Abstract: The propagation of a hydroacoustic signal is largely determined by the properties of the medium and the characteristics of the bottom. Accounting for the actual bottom topography in the normal mode method, which is used to calculate the range of a signal at low frequencies, is a computationally intensive task that can be solved by approximating the actual bottom topography with a set of segments with different constant depths. This paper examines the impact of the number of segments used to approximate the track on the computational time and accuracy.

Keywords: normal modes method, bottom surface approximation

PACS:43.30.+m

Введение

Задачи расчета поля потерь при распространении акустического сигнала имеют практическую важность в проектировании подводных систем связи [1]. Подобный расчет может быть выполнен различными методами, в том числе методом нормальных мод [2]. При

этом результаты решения такой задачи во многом зависят от способа учета рельефа дна, так как зачастую реальный рельеф имеет сложную форму.

В данной работе протяженный по дальности волновод разбивается на набор сегментов постоянной глубины, каждый из которых обладает своим профилем ВРСЗ и характеристиками грунта. Таким образом, протяженный по дальности волновод будет представлять из себя набор различных сегментов различной постоянной глубины. Результат применения подобной аппроксимации во многом определяется выбором количества сегментов аппроксимации рельефа дна, так как наличие излишне большого количества сегментов значительно увеличивает время численного решения задачи без сопоставимого увеличения точности, а использование недостаточного количества сегментов приводит к снижению точности вычислений. Следовательно, необходимо разработать подход к проведению поиска оптимального количества сегментов аппроксимации рельефа дна.

Целью настоящей работы является изучение влияния количества сегментов аппроксимации подводного акустического волновода на погрешность определения дальности доведения гидроакустического сигнала и на время численного расчета, а также выбор на основе этих данных оптимального количества таких сегментов.

1. Методы расчета распространения акустического сигнала

В данной работе используется компьютерная модель, разработанная на основе программы «KRAKENC» [3]. Для нахождения поля потерь акустического сигнала каждый из сегментов аппроксимации исходного волновода рассматривается как отдельный однородный по дальности волновод. Для каждого подобного волновода производится поиск собственных мод. Сшивка решений на границах полученных волноводов производится методом связанных мод [4]. Затем на основе полученного поля потерь рассчитываются дальности доведения сигнала.

При формировании реального рельефа дна для проведения исследований использовался массив данных GEBCO 2023 [5], предоставляющий рельеф дна на сетке с шагом 1/240 градуса.

2. Влияние количества сегментов аппроксимации рельефа дна на результаты расчета в мелком море

Исследование влияния количества сегментов аппроксимации рельефа дна на погрешность определения дальности доведения гидроакустического сигнала и на время численного расчета проводилось для двух протяженных волноводов, расположенных в мелком море, с различным рельефом дна. Частота излучения источника составляет 0.6 кГц. Протяженность рассматриваемых волноводов составляет 500 км. Первый волновод имеет изрезанный рельеф дна, включающий в себя наличие резких изменений глубины. Второй

волновод имеет пологую форму рельефа дна. На рис. 1 приведены используемые рельефы дна и их аппроксимация тремя сегментами.



Рисунок 1. Используемые рельефы дна протяженных волноводов в мелком море и их аппроксимация тремя сегментами: а) изрезанный рельеф; б) пологий рельеф

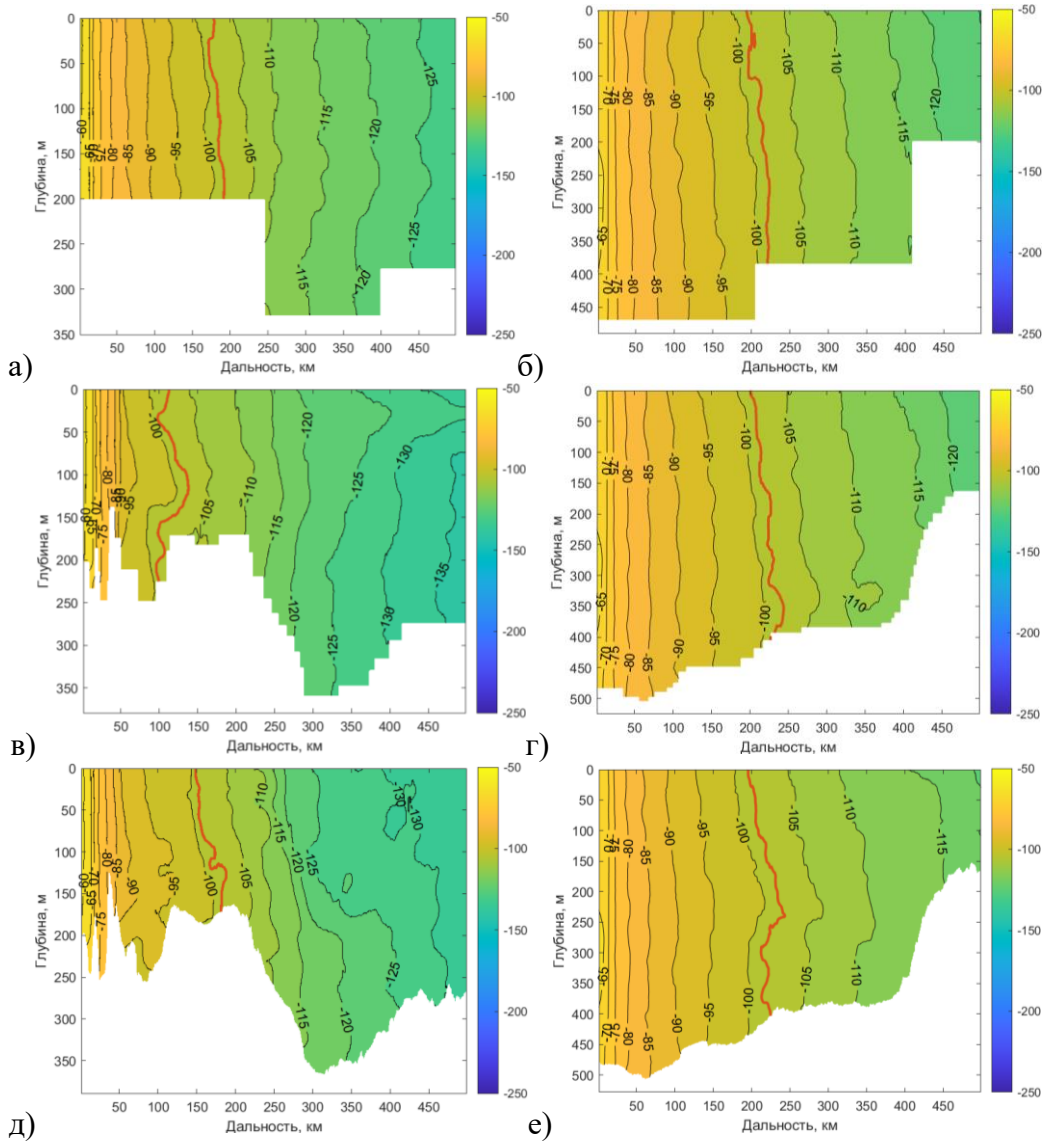
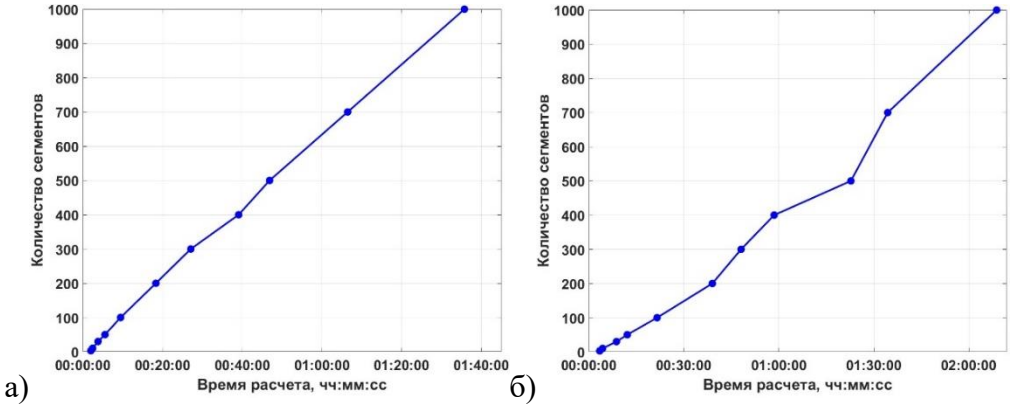


Рисунок 2. Поле потерь при распространении сигнала для протяженных волноводов в мелком море при их аппроксимации тремя (а, б), тридцатью (в, г) и тысячей (д, е) сегментов. Слева – изрезанный рельеф, справа – пологий рельеф. Красной линией обозначена дальность доведения сигнала

На рис. 2 приведены расчеты поля потерь при распространении сигнала при аппроксимации рельефа трассы тремя, тридцатью и тысячей сегментами. Дальность доведения

сигнала определяется расстоянием, на котором уровень потерь при распространении сигнала составляет 101.47 дБ.

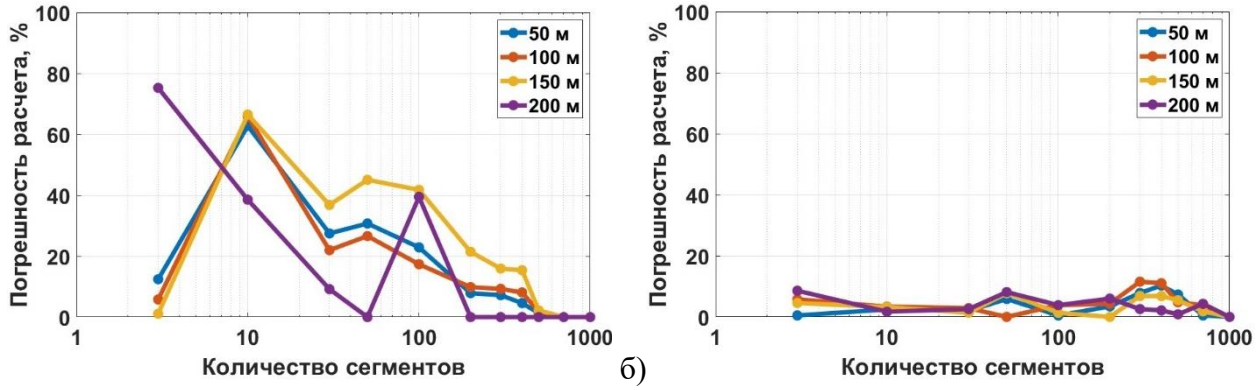
Для исследования в мелком море использовалось следующее количество сегментов: 3, 10, 30, 50, 100, 200, 300, 400, 500, 700 и 1000. На рис. 3 представлена полученная зависимость времени расчета дальности доведения гидроакустического сигнала в мелком море от количества сегментов аппроксимации.



а) б)

Рисунок 3. Зависимость времени расчета поля акустических потерь точечного источника от количества сегментов аппроксимации для протяженных волноводов с а) изрезанным рельефом дна; б) пологим рельефом дна

Из рис. 3 видно, что зависимость времени расчета от количества сегментов аппроксимации трассы близка к линейной для обоих рассматриваемых типов рельефа дна.



а) б)

Рисунок 4. Зависимость погрешности расчета дальности доведения от количества сегментов аппроксимации трассы для различных глубин постановки источника сигнала для протяженных волноводов с а) изрезанным рельефом дна; б) пологим рельефом дна

Также были проведены исследования зависимости погрешности расчета дальности доведения акустического сигнала от количества сегментов аппроксимации для различных глубин постановки приемника: 50 м, 100 м, 150 м и 200 м. Оценка погрешности расчета проводилась по формуле:

$$d = \frac{L_i}{L_{\max}} \cdot 100\%,$$

где d – погрешность в процентах;

L_i – дальность доведения на трассе, состоящей из i сегментов;

L_{max} – дальность доведения на трассе, состоящей из 1000 сегментов.

На рис. 4 представлены полученные зависимости погрешности расчета от количества сегментов аппроксимации для рассматриваемых волноводов.

Из рис. 4 видно, что с увеличением количества сегментов аппроксимации погрешность расчета для волновода с изрезанным рельефом дна уменьшается независимо для всех глубин постановки приемника. При этом погрешность расчета дальности доведения сигнала для различных глубин постановки приемника может существенно отличаться. Например, при использовании 3 сегментов аппроксимации погрешность расчета достигает 75% при постановке источника на глубине 200 метров, тогда как на иных рассмотренных глубинах постановки она не превышает 15%. В то же время для волновода с пологим рельефом дна погрешность определения дальности доведения гидроакустического сигнала не имеет ярко выраженной зависимости от количества сегментов аппроксимации.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что погрешность расчета дальности доведения гидроакустического сигнала в мелком море при аппроксимации рельефа дна сегментами постоянной глубины существенным образом зависит от формы рельефа дна. Оптимальным количеством в мелком море можно считать 200 сегментов аппроксимации, так как в данном случае погрешность расчета не превышает 20% для всех рассмотренных глубин постановки приемника.

3. Влияние количества сегментов аппроксимации рельефа дна на результаты расчета в глубоком море и в переходных трассах

Исследования влияния количества сегментов аппроксимации рельефа дна на погрешность расчета дальности доведения и на время численного расчета были проведены аналогичным разделу 2 данной работы образом для глубокого моря и переходных трасс (из мелкого моря в глубокое и наоборот). Оценка оптимального количества сегментов в глубоком море составила 50 единиц. Данное количество сегментов обеспечивает величину погрешности на уровне 10-15% для рассмотренных рельефов дна и глубин постановки приемника. В то же время использование меньшего количества сегментов приводит к возрастанию погрешности определения дальности доведения сигнала вплоть до 36%, а использование большего количества сегментов приводит к существенному возрастанию временных затрат на проведение расчетов, так как вычисления в глубоком море занимают значительно большее время по сравнению с расчетами в мелком море при одном и том же количестве сегментов.

При рассмотрении переходных трасс получена оценка оптимального количества сегментов, которая составила 50 сегментов аппроксимации рельефа дна. Данное количество сегментов обеспечивает величину погрешности на уровне 10-15% для рассмотренных форм рельефа дна и глубин постановки приемника.

Заключение

В ходе проведения данной работы изучалось влияние количества сегментов аппроксимации подводного акустического волновода на погрешность определения дальности доведения акустического сигнала и на время численного расчета для протяженного волновода в условиях глубокого и мелкого морей. Показано, что зависимость времени расчета от количества сегментов аппроксимации трассы является близкой к линейной. Также показано, что погрешность расчета во многом зависит от конкретного рельефа дна. В результате работы было определено оптимальное количество сегментов для рассмотренных трасс в мелком море – 200, а для трасс в глубоком море и переходных трасс – 50.

В дальнейшем планируется рассмотреть большее количество трасс с различными формами рельефа дна с целью проверки возможности распространения на них полученных оценок оптимального количества сегментов аппроксимации рельефа дна, а также уточнения влияние конкретной формы рельефа дна на эти оценки.

Список литературы

1. *Урик. Р.* Дж. Основы гидроакустики / Пер. с англ. – Л.: Судостроение, 1978. 448 с.

2. *Jensen F. B.* et al. Computational ocean acoustics. – New York, NY: Springer New York, 2011. – Т. 2011.

3. Porter M. B. Acoustic Toolbox. Электронный ресурс. – URL: http://www.hlsresearch.com/oalib/Modes/AcousticToolbox/ (дата обращения: 07.04.2026)

4. *Evans R. B.* A coupled mode solution for acoustic propagation in a waveguide with stepwise depth variations of a penetrable bottom //The Journal of the Acoustical Society of America. – 1983. – Т. 74. – №. 1. – С. 188-195.

5. General Bathymetric Chart of Oceans (GEBCO). Электронный ресурс. – URL: https://www.gebco.net/ (дата обращения: 07.04.2026).

УДК 534.23.1 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39466

Разработка технологии дистанционной подстройки интерферометра

Громашева О.С.[1)], Плюта Д.В.[1)], Чупин В.А.[1)]

[1)] ФГБУН Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева, г. Владивосток
Тел.: [1)]+7 (914) 66-48-505, E-mail: [1)]gromasheva@poi.dvo.ru

При проведении исследований с помощью лазерного деформографа, входящего в измерительный комплекс лаборатории физики геосфер ТОИ ДВО РАН на морской экспериментальной станции «Мыс Шульца» в бухте Витязь, возникает проблема обеспечения стабильной работы деформометра для непрерывного наблюдения измеряемых параметров. В отсутствие внештатных ситуаций все приборы комплекса работают в автономном режиме. Однако в случаях, когда интерференция нарушается, показания лазерных интерферометров искажаются, и приборы при этом необходимо настраивать вручную. Интерференция пропадает ввиду нарушения параллельности лучей лазера под влиянием различных внешних факторов. Таковыми могут выступать микросмещения элементов схемы относительно друг друга из-за деформаций земной коры и усадки грунта, деградация материалов, резкие температурные колебания, вибрационные воздействия и другие. При этом работу прибора необходимо остановить, и изменить положение зеркал юстировочного узла. В работе представлена система дистанционной настройки интерференции, разработанная с использованием шаговых двигателей, микроконтроллерной техники и веб-приложений.

Ключевые слова: лазерный деформограф, взаимодействие литосферы-атмосферы-гидросферы, микроконтроллеры, веб-приложения.

Development of interferometer remote tuning technology

Gromasheva Olga S[1)], Dmitriy Plyuta V[1)], Vladimir Chupin A[1)]

[1] *V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences, 690041, Vladivostok, Russia.*
Тел.: [1)]+7 (914) 66-48-505, E-mail: [1)]gromasheva@poi.dvo.ru

Abstract: When conducting research using a laser strainmeter, which is part of the measuring complex of the Laboratory of Geospheric Physics of the POI FEB RAS at the marine experimental site "Shults Cape", the problem arises of ensuring stable operation of the strainmeter for continuous monitoring of the measured parameters. In the absence of emergency situations, all devices of the complex work offline. However, in cases where

interference pattern is disrupted, the readings of the laser interferometers are distorted, and the instruments must be adjusted manually. Interference pattern disappears due to a violation of the parallelism of the laser beams under the influence of various external factors. These may include micro-displacements of circuit elements relative to each other due to crustal deformations and soil shrinkage, degradation of materials, sudden temperature fluctuations, vibration effects, and others. In this case, the operation of the device must be stopped and the position of the mirrors of the adjustment unit must be changed. The paper presents a remote interference pattern tuning system developed using stepper motors, microcontroller technology, and web applications.

Keywords: laser strainmeter, lithosphere-atmosphere-hydrosphere interaction, microcontrollers, web applications.

Введение

Существуют разные методы изучения переходных процессов на границе литосферы-атмосферы-гидросферы, один из которых – использование лазерных интерферометров [1]. На морской экспериментальной станции «Мыс Шульца» ТОИ ДВО РАН развернут масштабный геофизический полигон, в состав которого входят различные лазерно-интерференционные системы, позволяющие проводить детальный анализ явлений из соседних геосфер, определять причинно-следственные связи и исследовать переходные процессы [2].

Наиболее масштабная и значимая часть измерительного комплекса – двухкоординатный лазерный деформограф, измеряющий микродеформации верхнего слоя земной коры в любом частотном диапазоне. Прибор основан на схеме интерферометра Майкельсона и состоит из двух компонент, длиной 52.5 метров и 17.5 метров, расположенных в подземных помещениях – для изоляции от воздействия атмосферных и температурных процессов. Кроме того, в состав комплекса входят лазерный нанобарограф, регистрирующий колебания атмосферного давления, и лазерный измеритель вариаций давления гидросферы; оба прибора имеют устройство, сходное с лазерным деформографом.

Расположение основных измерительных приборов показано на рис. 1. Помимо экспериментальной станции «Мыс Шульца», лазерные деформометры расположены в только других местах Приморского края и за его пределами: один деформограф функционирует на мысе Свободный о. Сахалин, еще один на о. Попова, третий развернут на побережье Черного моря совместно с Морским Гидрофизическим Институтом РАН [3].

Измерительный комплекс на станции «Мыс Шульца» существует более четырех десятилетий, на протяжении которых непрестанно совершенствуется и дополняется,

внедряются новые технологии. В отсутствие внештатных ситуаций все приборы комплекса непрерывно работают в автономном режиме. Но в некоторых ситуациях требуется вмешательство оператора: параллельность лучей может нарушиться, и тогда прибор необходимо настраивать вручную. Если неисправность не устранить своевременно, показания прибора все более искажаются, а затем теряются вовсе. Особенно актуальна данная проблема для лазерных деформографов, установленных за пределами экспериментальной станции, так как на них не ведется дежурство. Для решения проблемы была разработана система дистанционной настройки прибора.

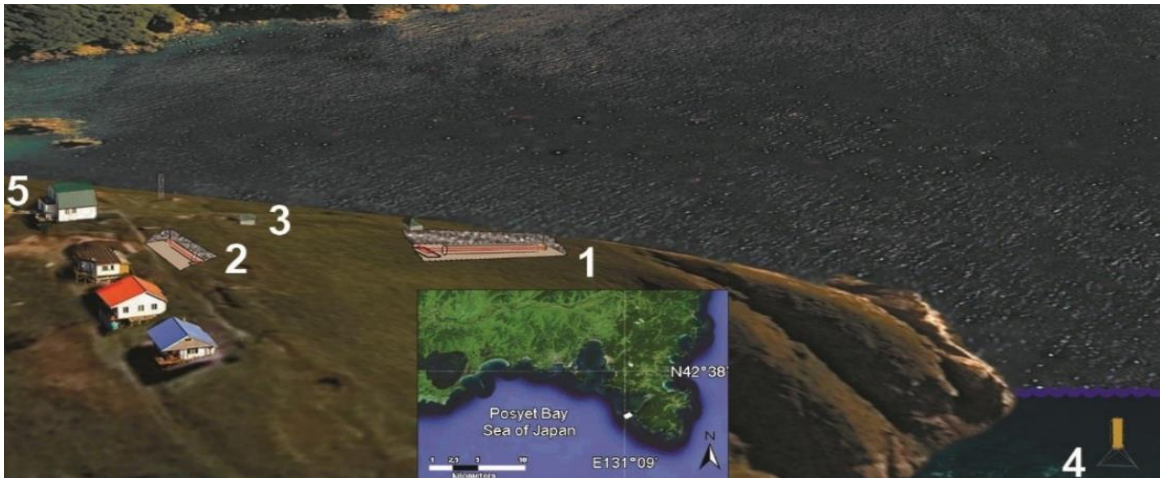


Рис. 1. Схема МЭС «Мыс Шульца»: 1 – лазерный деформограф с длиной измерительного плеча 52,5 м; 2 – лазерный деформограф с длиной измерительного плеча 17,5 м; 3 – лазерный нанобарограф; 4 – лазерный измеритель вариаций давления гидросферы; 5 – лабораторное помещение.

1 Обоснование разработки системы

Как уже упоминалось выше, лазерный деформограф основан на схеме неравноплечего интерферометра Майкельсона, изображенной на рис. 2. Для получения двух взаимно когерентных лучей во всех интерферометрах используется один источник света S, волну от которого тем или иным способом разделяют на две части и накладывают друг на друга, вызывая деление интерференции.

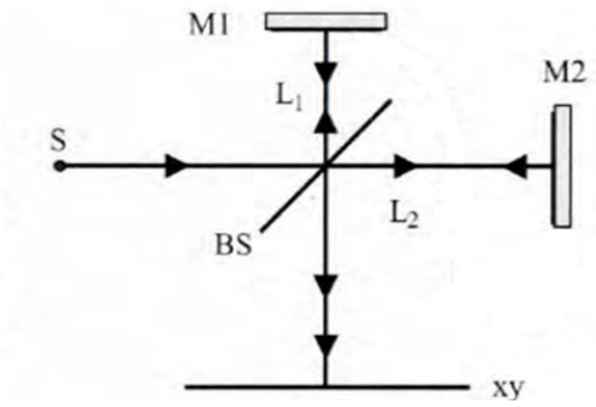


Рис. 2. Оптическая схема интерферометра Майкельсона. S – источник света, M1 и M2 – плоские зеркала, BS – делительная пластина.

В интерферометре Майкельсона для этого используется полупрозрачная делительная пластина BS, расположенная под углом, близким к 90° к волновому фронту. Часть света пластина пропускает сквозь себя, другая же часть отражается. Оба полученных луча отражаются от зеркал L1 и L2, и, проходя повторно через делительную пластину, совмещаются в одной точке на плоскости наблюдения XY, в результате получается интерференционная картина. На рис. 3 представлен деформограф, развернутый в лабораторных условиях.

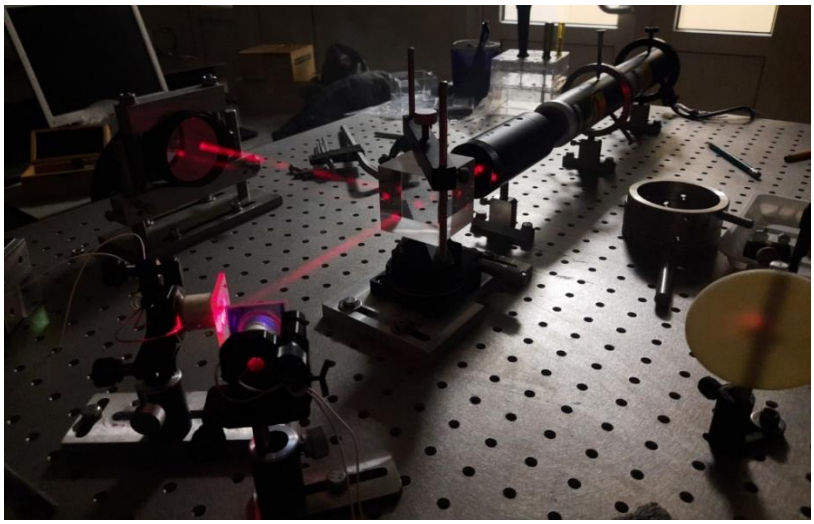


Рис. 3. Лазерный деформограф в лабораторных условиях.

Измерение микроколебаний земной коры достигается следующим образом: так как длина волны лазера мала, луч, прошедший через длинное плечо, при самых незначительных деформациях земной коры приобретает достаточную разность хода с эталонным лучом, чтобы интерференционная картина начала меняться. Предположим, что синфазные лучи начинают смещаться к противофазе, тогда центральный максимум сменяется центральным минимумом. Здесь начинает работать система компенсации и регистрации. Интерференция наводится на фотодиод, с помощью которого анализируется яркость попадающего на него пучка света. Зеркала юстировочного узла закреплены на пьезокерамических основаниях. В системе постоянно работает микроконтроллер, анализирующий данные с фотодиода и управляющий пьезокерамиками: когда интерференционная картина начинает меняться, на пьезокерамику зеркала компенсации подается напряжение, в результате чего изменение размера пьезокерамики и соответствующее смещение зеркала компенсирует разность хода луча, удерживая интерференционную картину в постоянном состоянии. Напряжение, подающееся на компенсирующую керамику, считается полезным сигналом, и записывается через АЦП как полученные данные. Зеркало раскачки в свою очередь закреплено на пьезокерамике, на которую подается переменное напряжение с частотой, значительно превосходящей частоту дискретизации АЦП, и из-за которого зеркало совершает колебательные микросмещения вдоль одной оси, что позволяет микроконтроллеру оценить,

в какую сторону смещается интерференция, и подать соответствующее напряжение на пьезокерамику компенсации [4].

Описанная система тщательно настраивается при установке, после чего работает автономно. Однако в практическом применении прибор функционирует непрерывно на протяжении многих лет, и неизбежны случаи нарушения интерференции, поэтому необходимо на постоянной основе проводить мониторинг состояния сигнала. Интерференция пропадает ввиду нарушения параллельности лучей лазера под влиянием различных внешних факторов. Таковыми могут выступать, например, микросмещения элементов схемы относительно друг друга из-за деформаций земной коры и усадки грунта, деградация материалов, резкие температурные колебания, вибрационные воздействия. При этом работу прибора необходимо остановить, и изменить положение зеркал юстировочного узла, подкрутив юстировочные винты, чтобы лучи снова стали параллельными. Чтобы повысить автономность прибора, была рассмотрена идея механизированной подстройки взамен ручной.

2 Техническая реализация системы подстройки интерферометра

Для подстройки интерференции используются шаговые двигатели с редуктором 42BY12 и драйверы шаговых двигателей SMD-1.8 фирмы Электропривод. Сама подстройка интерференции осуществляется посредством изменения угла наклона зеркал раскачки и компенсации в схеме интерферометра. Держатели зеркал встречаются различных модификаций, часто используются держатели с двумя степенями свободы. Считаем, что смещения лучей, приводящие к нарушению интерференции, незначительны, а потому нивелировать их возможно регулировкой направления лишь одного луча. Такое условие вполне обосновано: если имеет место значительное отклонение лучей от параллельности, при котором требуется настройка обоих пучков света, автоматическая настройка становится слабо применимой ввиду большей вариативности нарушений – автоматизировать такой процесс сложнее. Однако крупные смещения возникает редко и являются скорее неординарным происшествием, поэтому допустимо использовать механическую подстройку в случае неизбежных небольших смещений, а при чрезвычайных происшествиях и во время планового технического обслуживания настраивать систему вручную. Таким образом, для подстройки требуются два шаговых двигателя, каждый из которых отвечает за одну из степеней свободы держателя зеркала.

Для управления работой шаговых двигателей используются микроконтроллеры и драйверы шаговых двигателей. Схема системы приведена на рис. 4. Рассмотрим алгоритм:

1. Компьютерная программа отправляет его на микроконтроллер команды, содержащие информацию о направлении и скорости вращения конкретного шагового двигателя и количестве совершаемых оборотов;

2. Микроконтроллер, находящийся в режиме постоянного прослушивания канала связи, принимает отправленное команды, и отправляет соответствующие управляющие импульсы на драйверы шаговых двигателей – управляющие устройства, которые меняют ток на обмотках двигателей в соответствии с принятыми инструкциями.;

3. Драйверы шаговых двигателей принимают управляющие импульсы и инициируют вращение шаговых двигателей в указанном режиме.

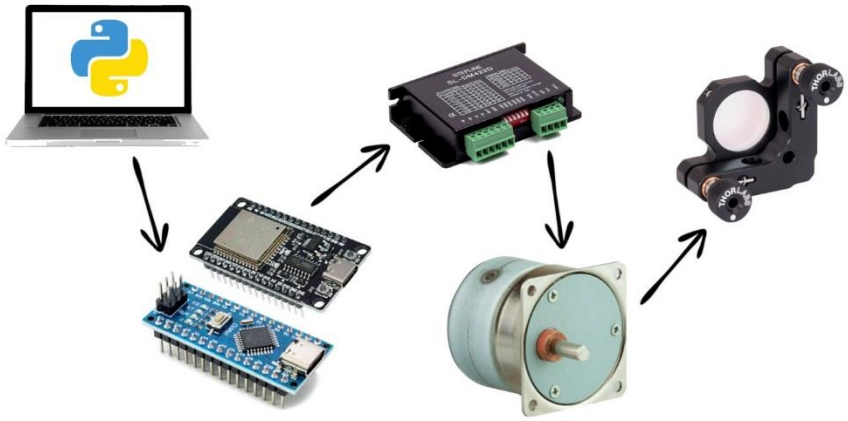


Рис. 4. Технические элементы схемы управления шаговыми двигателями.

Использовались микроконтроллеры двух типов – Arduino Nano и ESP32 DevKit V1. Микроконтроллер Arduino Nano подключается к управляющему компьютеру через проводное соединение и постоянно прослушивает последовательный порт, по которому передаются команды. Микроконтроллер ESP32 DevKit V1 поддерживает Wi-Fi соединение, поэтому при его использовании проводное соединение с управляющим компьютером не требуется, но необходимо, чтобы между компьютером и микроконтроллером было настроено сетевое взаимодействие.

Минимально возможная величина шага используемых шаговых двигателей с редуктором – 0.05°, что достаточно для точной подстройки устройства. Система реализована в виде веб-приложения, разработанного на базе Flask, микрофреймворка для языка Python, содержащего набор инструментов для создания веб-сайтов. Веб-интерфейс содержит трансляцию изображения с видеокамеры и панель управления шаговыми двигателями, демо-версия интерфейса приведена на рис. 5. Дежурный, подключаясь к приложению, способен визуально оценить состояние интерференционного пятна, и при необходимости принять меры. Панель управления шаговыми двигателями позволяет выбрать скорость и направление вращения каждого двигателя и количество совершаемых шагов, что позволяет настроить

интерференцию, руководствуясь изображением на экране, транслируемом в реальном времени.



Рис. 5. Демо-версия интерфейса веб-приложения.

Компьютер, на котором развернут веб-сервер, должен иметь доступ к видеокамере, захватывающей изображение интерференции. Это может быть как непосредственное проводное подключение, так и нахождение в общей сети для тех камер, которые поддерживают сетевое взаимодействие. Основное требование – наличие возможности программного получения изображение с камеры через компьютер. Для каждой используемой камеры может быть написан отдельный программный модуль для получения изображения, при этом необходимость менять код самого веб-приложения отсутствует. Такое решение повышает гибкость системы, так как отсутствует привязка к конкретной модели камеры.

Трансляция изображения в реальном времени реализована с помощью потоковой передачи – метода, при котором сервер отправляет ответ на запрос частями. Чаще эта технология применяется для организации возможности работы с большим объемом данных без полной их загрузки, однако допустимо использование в случаях, когда необходимо поддерживать актуальность данных в реальном времени без необходимости перезагрузки веб-страницы – именно такой случай имеет место в нашем проекте. Наиболее простой способ потоковой передачи видео, используемый во многих камерах видеонаблюдения, называется Motion-JPEG, и подразумевает передачу независимых изображений в формате JPEG, сменяющих друг друга. Хотя такой способ не обеспечивает высокого качества и не столь экономичен, как более совершенные кодирования, он прост в использовании и поддерживается всеми браузерами.

В маршрутизаторе сети прописывается проброс порта: входящие соединения на указанный порт перенаправляются во внутреннюю сеть на IP-адрес серверного компьютера. Таким образом, устройство сотрудника подключается извне к указанному домену, соединение перенаправляется на сетевое расположение веб-приложения Flask, и

представляется возможность через произвольный браузер проверить состояние интерференции и при необходимости произвести ее подстройку из любого места. При разработке системы учитывались требования к информационной безопасности, поэтому были приняты меры сетевой защиты для обеспечения невозможности внедрения посторонних лиц в сеть с целью получить доступ к устройствам в сети. Безопасность веб-приложения достигнута путем применения средств защиты, предусмотренных фреймворком Flask и другими библиотеками языка Python.

Заключение

Описанная модификация лазерных интерферометров имеет большое практическое значение, так как метод лазерной интерферометрии продолжает развиваться, и одно из приоритетных направлений – использование пространственного разнесения приборов [5]. Так как круглосуточное дежурство во многих случаях труднореализуемо, чрезвычайно важно иметь возможность проверять состояние прибора и устранять неполадки дистанционно.

Стоит сказать, что при разработке системы соблюдались требования по обеспечению информационной безопасности: рассматривались все типы угроз, и применялись соответствующие меры защиты. Таким образом, внедрение технологии гарантирует стабильность работы при проведении экспериментов и сохранность экспериментальных данных.

Список литературы

1. *Dolgikh G.I., Gromasheva O.S., Dolgikh S.G., Plotnikov A.A.* Dynamics and transformation of sea surface gravity waves at the shelf of decreasing depth. // J. Mar. Sci. Eng. 2021. **9**, N 8.

2. *Долгих Г.И., Долгих С.Г., Чебров В.Н., Шевченко Ю.В*. Геофизический полигон «Мыс Шульца». //Вестник ДВО РАН. 2010. Т.5 С. 165-169.

3. *Чупин В.А., Швец В.А., Яковенко С.В.. Латушкин А.А., Гармашов А.В.* Лазерный деформометр на Черноморском гидрофизическом подспутниковом полигоне // Моря России: приоритеты, практика, прогноз. 2025. С. 32-33.

4. *Долгих Г.И., Привалов В.Е*. Лазерная физика. Фундаментальные и прикладные исследования. Владивосток, 2016.

5. *Долгих С.Г*. Изучение собственных колебаний Земли пространственно-разнесенными лазерными деформографами // Физика геосфер. 2013. С.79-81.

УДК: 534.86+539.3 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39467

Анализ влияния механических и геометрических параметров излучателя на его характеристики

А.К. Британков[a], Р.В. Травин[b]

[1] *Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИПФ РАН). Нижний Новгород 603950, ул. Ульянова, 46.*

E-mail: [a]britenkov@ipfran.ru, [b]r.travin@ipfran.ru

Аннотация: С расширением сферы приложений подводной гидроакустики возрастает актуальность разработки источников акустических полей высокой интенсивности, и в частности, компактных гидроакустических преобразователей высокой удельной мощности. Пьезоэлектрические активные элементы позволяют проектировать излучатели в широком диапазоне заданных характеристик. Однако взаимовлияние таких параметров, как размеры активных элементов, геометрии и свойств материалов излучающих оболочек требуют системного подхода при проектировании преобразователей с наибольшей эффективностью. В докладе приведены результаты моделирования по оценке влияния на электроакустические характеристики компактного низкочастотного гидроакустического преобразователя продольно-изгибного типа вариации размеров его активного элемента и материальных констант излучающей оболочки.

Ключевые слова: гидроакустический излучатель, пьезокерамика, активный элемент, резонанс, электроакустика, звуковое давление, математическое моделирование.

Analysis of the influence of mechanical and geometric parameters of the emitter on its characteristics

A.K. Britenkov[1,a], R.V. Travin[1,b]

[1] *Federal Research Center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences (IAP RAS). Nizhny Novgorod 603950, Russia, 46 Ul'yanov Street.*

E-mail: [a]britenkov@ipfran.ru, [b]r.travin@ipfran.ru

Abstract: As the scope of underwater hydroacoustics applications expands, the development of high-intensity acoustic field sources, using compact hydroacoustic transducers, is becoming increasingly important. Piezoelectric active elements allow for the design of transducers with a wide range of specified characteristics. However, the interaction of parameters such as the active element size and geometry, as well as the properties of the radiating shell, requires a systematic approach to designing

transducers with the greatest efficiency. This paper presents the results of a modeling study examining the changes in the electroacoustic characteristics of a compact low-frequency hydroacoustic transducer depending on variations in the size of its active element and the parameters of the radiating shell.

Keywords: hydroacoustic emitter, piezoceramics, active element, resonance, electroacoustics, sound pressure, mathematical modeling.

PACS: 43.38.−p

Введение

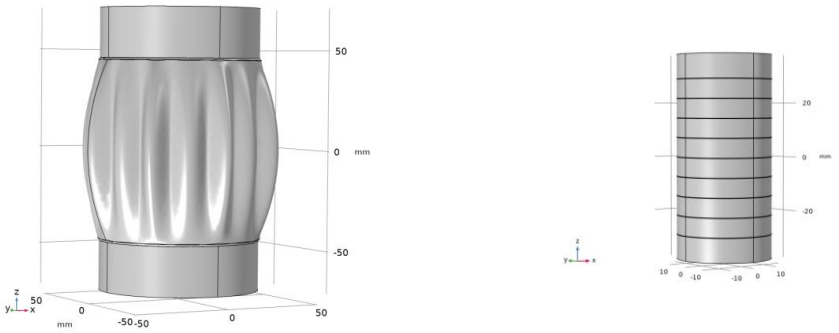
Современный этап развития гидроакустических средств характеризуется лавинообразным расширением круга решаемых задач, что зачастую предъявляет повышенные требования к техническим решениям и инженерному обеспечению. Одним из важных направлений гидроакустики является разработка источников акустических полей высокой интенсивности для обеспечения передачи гидроакустических сигналов на расстояния не только в сотни метров, но также в десятки и сотни километров. Поскольку КПД преобразования электрической энергии в механическую для обратного пьезоэлектрического эффекта достигает 95-98 %, подавляющее большинство гидроакустических преобразователей в настоящее время изготавливаются на основе пьезокерамических активных элементов [1]. В некоторых случаях высокий КПД и обратимость пьзоэлектрического преобразования используется для приема такими преобразователями гидроакустических сигналов [2], что также является важным аргументом использования в излучателях активных элементов на основе пьзокерамики.

Однако, несмотря на преимущества, достижение максимальной эффективности преобразователя, особенно в низкочастотном диапазоне, является нетривиальной задачей. Это обусловлено сложностью многообразием процессов, происходящих при электроакустическом преобразовании электрических сигналов в колебания излучающих элементов. Основные параметры излучателя, определяющие его эффективность – рабочая частота, чувствительность, излучаемая мощность и электрический импеданс – определяются совокупностью факторов, связанных как с устройством излучателя, включая его геометрию, материал и размеры корпуса и других конструктивных элементов, так и с характеристиками активного элемента. Изменение одного из этих параметров оказывает влияние на всю систему характеристик преобразователя, что делает эмпирический подход к проектированию неэффективным. Таким образом, использование на этапе проектирования численного моделирования для оценки влияния конструктивных решений на итоговые характеристики устройства позволяет найти оптимальные сочетания параметров преобразователя, обеспечивающие наилучшие показатели при требуемых частотных характеристиках.

1 Влияние размеров активного элемента на характеристики излучателя

Согласование параметров активного элемента с оболочкой излучателя обеспечивает эффективное преобразование электрической энергии в акустическую. Изменение размеров активного элемента влияет на основные характеристики излучателя, в том числе на его чувствительность. Для оценки такой зависимости в расчетах использовалась модель компактного низкочастотного гидроакустического излучателя продольно-изгибного типа с гофрированной цельнометаллической излучающей оболочкой сложной формы [3] (рис. 1, *а*).

Для исследования влияния вариации размеров активного элемента на электроакустические характеристики излучателя использовалась сборка в виде столба (рис. 1, *б*) длиной 75.6 мм и диаметром 34.3 мм, состоящего из 8 колец (34×16×7 мм), 2 фарфоровых изоляторов (34×16×9 мм) и 9 латунных контактных лепестков (34×16×0,2 мм).



а *б*

Рис. 1. Модель гидроакустического излучателя продольно-изгибного типа с гофрированной излучающей оболочкой и активный элемент, собранный из набора пьзокерамических колец

Вариация размеров активного элемента проводилась уменьшением диаметра колец на 8 мм при постоянном размере внутреннего отверстия и одновременным уменьшением внешнего и внутреннего диаметров с 34.3 и 16 мм до 22.3 и 12 мм соответственно (рис. 2).

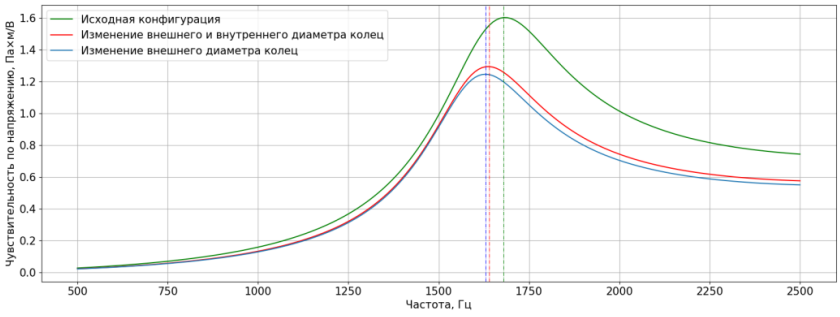


Рис. 2. Зависимость чувствительности излучателя по напряжению от частоты для различных размеров колец

Из рис. 2 видно, что уменьшение только внешнего, или обоих диаметров одновременно приводит к снижению чувствительности и незначительному сдвигу резонансной частоты излучателя. Уменьшение чувствительности в первую очередь обусловлено изменением эффективности пьезомодуля в результате изменения соотношения между электрическим

полем и механическими деформациями, а также уменьшением площади поперечного сечения активного элемента, приводящим к снижению отдаваемой им энергии колебаний оболочке преобразователя, выполняющей роль механического трансформатора. Снижение частоты основного резонанса излучателя с активным элементом меньшего диаметра с 1680 до 1630 Гц при изменении внешнего диаметра и 1640 Гц при изменении обоих диаметров является следствием существенного уменьшения жесткости при незначительном уменьшении массы. Причем изменение только внешнего диаметра больше отражается на изменении частоты. По аналогии с уменьшением диаметра активного элемента увеличение его длины пропорционально увеличивает чувствительность и снижает частоту основного резонанса.

Поскольку при моделировании рассматривался идеальный преобразователь без учета потерь, максимально достижимый в реальных условиях уровень чувствительности излучателя по напряжению окажется ниже расчетного, однако отклонение резонансной частоты от расчетной, как правило, незначительно и находится в пределах погрешностей [2].

На втором этапе моделирования проведены расчеты электроакустических параметров при увеличении количества колец с одновременным уменьшением их толщины (с 7.00 до 5.56 мм) при неизменной толщине в 0.2 мм контактных лепестков между ними (рис. 3).

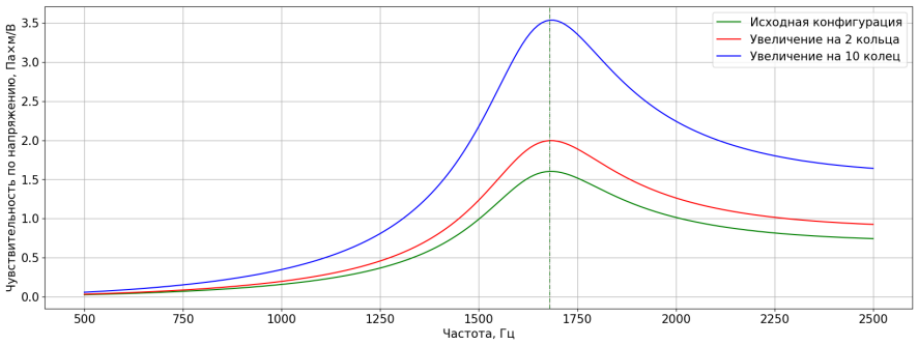


Рис. 3. Зависимость чувствительность по напряжению гидроакустического излучателя при разном количестве колец

При увеличении количества колец активного элемента в пьезокристалле увеличивается напряженность поля. С уменьшением толщины кольца s увеличивается чувствительность по напряжению, так как сохраняется его деформация при приложенном напряжения U, что при параллельном включении колец и начальном механическом напряжении T увеличивает общую деформацию активного элемента

$$\Delta L = b + n\frac{U}{s}d_{33}, \qquad (1)$$

где n – число колец, d_{33} – пьезомодуль одного кольца, b – переменная, определяемая упругой податливостью активного элемента и механическим напряжением T. Резонансная частота

зависит от жесткости и длины активного элемента, поэтому на нее практически не влияет вариация толщины пьезокерамических колец при сохранении размеров активного элемента.

2 Зависимость характеристик излучателя от свойств материала излучающей оболочки

В значительной степени такие характеристики излучателя, как КПД и диапазон рабочих частот, определяются геометрией и свойствами материала излучающей оболочки [4]. Материал оболочки влияет также на ресурс и эксплуатационные свойства подобных изделий. Не смотря на то, что выбор материала является более тривиальной задачей по сравнению с поиском наилучшей геометрии излучающих элементов, этот фактор значительно влияет на эффективность преобразователя и стоимость его изготовления. Из наиболее распространенных материалов с различными значениями материальных констант (табл. 1) наилучшие показатели обеспечивает титановый сплав Ti6Al-4V или ВТ6 [5].

Таблица 1

Материальные константы материалов излучающей оболочки

Материал	Модуль Юнга, ГПа	Плотность, кг/м^3	Коэффициент Пуассона
Титан Ti6Al-4V	103	4370	0.33
Нержавеющая сталь 12Х18Н10Т	198	7920	0.30
Алюминий АМг6	71	2640	0.31

Расчеты параметров излучателя с корпусом из алюминия [6] подтверждают, что низкая плотность материла при высокой вязкости увеличивает потери в колебательной системе преобразователя, уменьшая ее добротность, и, как следствие, снижает резонансную частоту и чувствительность по напряжению (рис. 4).

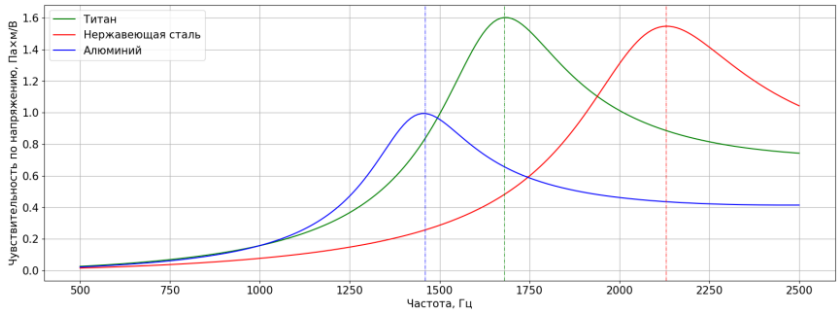


Рис. 4. Влияние материала корпуса излучателя на зависимость чувствительности по напряжению от частоты

Как видно на графике чувствительности (рис. 4), увеличение модуля Юнга приводит к повышению жесткости колебательной системы, а высокая плотность увеличивает акустический импеданс, в результате чего частота основного резонанса излучателя с корпусом из нержавеющей стали [7] выше на 25 % по сравнению с оболочкой из титана при похожем значении чувствительности. Таким образом, корпуса низкочастотных гидроакустических излучателей наиболее оптимально изготавливать из титана и его сплавов.

Заключение

Моделирование подтвердило, что параметры преобразователя в большей степени зависят от изменения свойств материала и геометрии излучающей оболочки, и в меньшей степени – от вариации размеров активного элемента. Изменение количества пьзокерамических колец активного элемента незначительно влияет на частотные характеристики и эффективность излучателя, тем не менее, повышая чувствительность с ростом их числа. С учетом полученных соотношений проектирование излучателя с определенными электроакустическими характеристиками (например, заданным частотным диапазоном), предполагает многократное решение расчетной задачи методами численного моделирования для создания матрицы взаимозависимых параметров с последующим синтезом – выбором их оптимального сочетания.

Список литературы

1. *Боголюбов Б.Н., Британков А.К., Касьянов Д.А., Фарфель В.А., Моргунов Ю.Н.* и др. Широкополосные низкочастотные излучатели в задачах исследования температурных режимов Японского моря // Acoustical Physics. 2025. **71**, № 1. С. 67-78.
2. *Британков А.К., Костеев Д.А., Травин Р.В., Фарфель В.А., Леонов И.И.* Характеристики компактного низкочастотного гидроакустического преобразователя высокой удельной мощности со сложной формой корпуса в режиме приёмника для использования в составе ретранслятора // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2025. **24**, № 3. С. 76-87.
3. *Британков А.К., Норкин М.С., Травин Р.В., Стуленков А.В.* Исследование электроакустических характеристик компактного 3D НЧИ – низкочастотного гидроакустического преобразователя продольно-изгибного типа сложной формы // Научное приборостроение. 2023. **33**, № 4. С. 28-39.
4. *Свердлин Г.М.* Гидроакустические преобразователи и антенны. Судостроение. Л., 1980.
5. ГОСТ 19807-91. Титан и сплавы титановые деформируемые. Марки (с Изменением N 1). Комитет стандартизации и метрологии СССР. М., 1992.
6. ГСССД 145-89. Деформируемые алюминиевые сплавы АМг6, Д16, В96Ц-1. Упругие свойства. Модуль нормальной упругости при температурах -80…300°С. М., 1990.
7. ГОСТ 5632-72. Стали высоколегированные и сплавы коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные. Издательство стандартов. М., 1975.

УДК 534.231 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39468

Влияние неоднородной структуры дна, стратификации водного слоя и поверхностного волнения на звуковые поля шумовых источников в мелководных акваториях Карского моря

С.Д. Боджона[1,2,3,4,a], Д.Д. Сидоров[1,b], Ю.В. Назаренко[1,c], А.А. Луньков[1,2,d], И.М. Кабатченко[3,4,e],В.В. Фомин[3,f]

[1]*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН. ул. Вавилова, 38, Москва, 119991, Россия.*

[2]*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана. ул. 2-я Бауманская 5, Москва, 105005, Россия.*

[3]*Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова. пер. Кропоткинский, 6, Москва, 119034, Россия.*

[4]*Московский физико-технический институт. Институтский переулок, 9, Долгопрудный, Московская область, 141700, Россия.*

E-mail: [a]bodjona@kapella.gpi.ru, [b]sidorov@kapella.gpi.ru, [c]nazarenko.yv@kapella.gpi.ru, [d]lunkov@kapella.gpi.ru, [e]wavelab1@yandex.ru, [f]vfomin@oceanography.ru

В рамках численного моделирования проведён анализ спектральных компонент (100 и 500 Гц) низкочастотного шумового поля, создаваемого приповерхностными источниками в двух мелководных волноводах Карского моря глубиной до 53 м: 1) с неоднородной трехмерной структурой верхнего слоя донных осадков, 2) с пространственной и временной изменчивостью параметров поверхностного волнения. Рассмотрено три характерных профиля скорости звука в воде, взятых из базы World Ocean Database: 1) с отрицательным градиентом, 2) с положительным градиентом, 3) постоянный по глубине профиль. Расчеты проведены с помощью метода широкоугольного параболического уравнения и метода нормальных волн (мод). Для области с неоднородным дном выполнена оценка азимутальной зависимости потерь при распространении звука от одиночного приповерхностного источника (судно). Для распределённых источников (ветровое волнение) определён размер области, с которой в заданную точку собирается шум, получены усредненные пространственные характеристики шумового поля ветрового волнения, а также проанализирован модовый состав шума в зависимости от профиля скорости звука в воде. На участке с известной пространственной и временной зависимостью характеристик волнения получены усреднённые по глубине потери от расстояния в случае одиночного источника,

излучающего в широкой полосе частот (100 – 1000 Гц). Расчеты выполнены для трёх режимов волнения. Продемонстрировано, что акустический ландшафт в рассматриваемых областях Карского моря определяется главным образом характеристиками донных осадков в месте проведения измерений.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-72-10121-П, https://rscf.ru/project/tuwTgU_rZlAQgbw5qs4GO7HjoVGeB9Ey_47DIsK4P65iauZqCshq8wKpUqoAnuRpnm7mAfZju7s~/.

Ключевые слова: акустика мелкого моря, подводный шум, потери при распространении, поверхностное волнение, стратификация водного слоя, неоднородности дна, широкоугольное параболическое уравнение.

Influence of Bottom Inhomogeneity, Water-Layer Stratification, and Surface Waves on the Sound Fields of Noise Sources in Shallow-Water Areas of the Kara Sea

S.D. Bodjona[1,2,a], D.D. Sidorov[1,b], Y.V. Nazarenko[1,c], A.A. Lunkov[1,2,d]

[1] *Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences. Moscow, 119991, Russia.*

[2] *Bauman Moscow State Technical University. Moscow, 105005, Russia.*

E-mail: [a]bodjona@kapella.gpi.ru, [b]sidorov@kapella.gpi.ru, [c]nazarenko.yv@kapella.gpi.ru, [d]lunkov@kapella.gpi.ru

Abstract: Within the framework of numerical modeling, an analysis was carried out of the spectral components (100 and 500 Hz) of a low-frequency noise field generated by near-surface sources in two shallow-water waveguides of the Kara Sea with depths up to 53 m: (1) a waveguide with an inhomogeneous three-dimensional structure of the upper sediment layer, and (2) a waveguide with spatially and temporally varying surface-wave parameters. Three characteristic sound-speed profiles in the water column obtained from the World Ocean Database were considered: (1) a profile with a negative gradient, (2) a profile with a positive gradient, (3) a depth-independent profile. The calculations were performed using the wide-angle parabolic equation method and the normal-mode method. For the area with an inhomogeneous bottom, the azimuthal dependence of transmission loss from a single near-surface source (a vessel) was evaluated. For distributed sources (wind-wave noise), the size of the region from which noise is collected at a given point was determined, averaged spatial characteristics of the wind-wave noise field were obtained, and the modal composition of the noise was analyzed as a function

of the sound-speed profile in the water. In the area with known spatial and temporal variability of wave characteristics, depth-averaged transmission loss versus range was obtained for a single source radiating over a wide frequency band (100–1000 Hz), for three sea-state conditions. Range–frequency distributions of transmission loss were constructed. It is demonstrated that the acoustic landscape in the considered Kara Sea regions is determined primarily by the characteristics of bottom sediments at the measurement site.

Keywords: shallow-water acoustics, underwater noise, transmission loss, surface waves, water-layer stratification, bottom inhomogeneity, wide-angle parabolic equation.

PACS: 43.30.+m, 43.20.+g

Введение

Формирование акустического ландшафта на арктическом шельфе представляет собой сложный процесс, определяемый как особенностями среды распространения звука — гидрологией и характеристиками границ волновода, — так и внешними условиями, прежде всего скоростью и направлением ветра [1]. В отсутствие ледяного покрова основной вклад в фоновое низкочастотное шумовое поле, как правило, вносят источники, связанные с поверхностным волнением, а также антропогенные шумы, обусловленные судоходством [2, 3]. Большинство ранее опубликованных работ было посвящено теоретическому анализу влияния одного или нескольких отдельных факторов на распространение акустического сигнала. Так, в [1] исследовалась роль стратификации водного слоя, в [4] — влияние поверхностного волнения, а в [5] нами были изучены характеристики шумового поля в мелком море с неоднородной структурой дна. В настоящей работе выполнена оценка влияния свойств неоднородных донных осадков, типа гидрологических условий и режима волнения на окружающий шум в мелководной акватории Карского моря.

Мелководный волновод Карского моря

Рассматриваются три профиля скорости звука $c_w(z)$ в водном слое в осенний период (сентябрь-ноябрь), типичные для мелководной части Карского моря, подверженной влиянию материкового стока. Эти профили, представленные на рис. 1,а, получены из всемирной базы океанологических данных World Ocean Database [6]. В настоящей работе зависимость скорости звука в водной толще рассматривается исключительно как функция глубины, т.е. $c_w = c_w(z)$. Но следует отметить, что в условиях присутствия внутренних волн будет проявляться зависимость скорости звука от

горизонтальных координат, приводящая к более сложному пространственному распределению акустических свойств водного слоя.

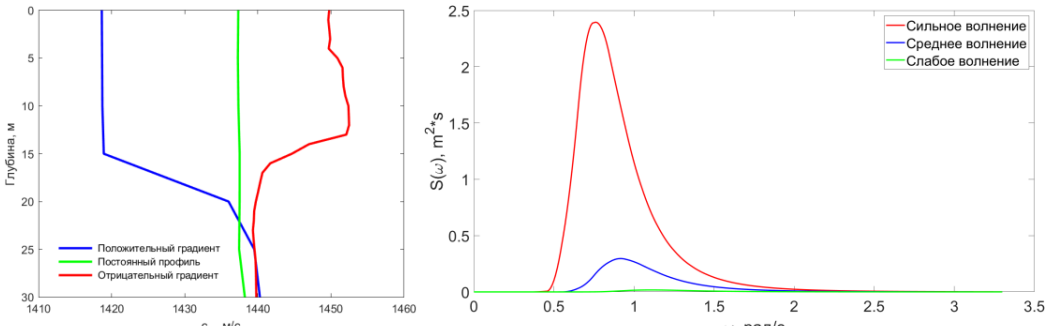


Рис. 1. Профили скорости звука в водном слое (а) и характерные частотно-энергетические спектры ветрового волнения.

Характеристики поверхностного волнения рассчитывались по данным Copernicus Marine Service [7] за октябрь 2025 г. на мелководном участке Карского моря (с глубиной от 20 до 30 м) в модели WAM [8]. По результатам вычислений выбраны три характерных энергетических спектра (рис. 1,б), соответствующих трём режимам волнения: слабое (минимальная за месяц значительная высота волн H_s = 0.42 м, поверхность можно считать фактически невозмущенной), среднее (H_s = 1.57 м) и сильное (максимум, H_s = 4.12 м).

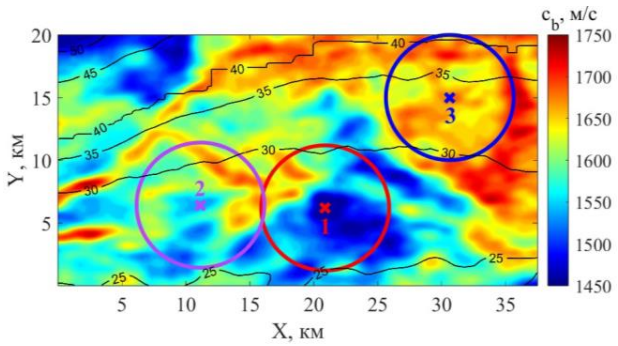


Рис. 2. Горизонтальный разрез поля скорости звука в дне на глубине $z = 52$ м с указанием круговых областей, для которых рассчитывались потери при распространении. Крестиками отмечены точки расположения источников звука. Тонкими черными линиями показаны изобаты.

Неоднородность донного слоя учитывается посредством трёхмерного распределения скорости звука в дне $c_b(x, y, z)$, полученного в результате инженерной сейсморазведки [9] в мелководной акватории Карского моря с известной батиметрией. На рис. 3 представлен горизонтальный разрез поля скорости звука в дне на глубине $z = 52$ м. В рамках численного моделирования с помощью метода широкоугольного параболического уравнения [10] и нормальных мод [11] плотность дна считается постоянной и берется равной $\rho_b = 1850$ кг/м^3. Коэффициент затухания – $\beta_\lambda = 0.33$ дБ/λ. На глубинах более 80 м параметры дна предполагаются

такими же, как на глубине 80 м, чтобы избежать ложных отражений. Коэффициент затухания при этом увеличивается линейно с глубиной, начиная с 80 м.

Результаты

В области с неоднородным дном выделены три области радиусом 5 км (рис. 3), отличающихся средней по глубине скоростью звука в дне $< c_b >_z$. В Точке 1 она равна $< c_b >_z$= 1460 м/с при толщине водного слоя H = 28 м, в Точке 2 – $< c_b >_z$= 1540 м/с и H = 29 м, в Точке 3 – $< c_b >_z$= 1660 м/с и H = 32 м. В каждой области выделяется $L = 36$ направлений с шагом по углу $\Delta\varphi = \frac{\pi}{18} = 10°$ между ними. Морская поверхность считалась абсолютно ровной. Азимутальные зависимости средних по глубине потерь от расстояния при глубине источника $z_s = \lambda/4$: $\bar{T}L(r,\varphi;f) = 10\ \lg \bar{I}^0_{src}(f)/\bar{I}_{src}(r,\varphi;f)$, где $\bar{I}^0_{src}$ – средняя интенсивность на расстоянии 1 м от источника, показаны на рис. 3,а для частоты f = 100 Гц и на рис. 3,б для частоты f = 500 Гц для трёх типов стратификации водного слоя в каждой из областей.

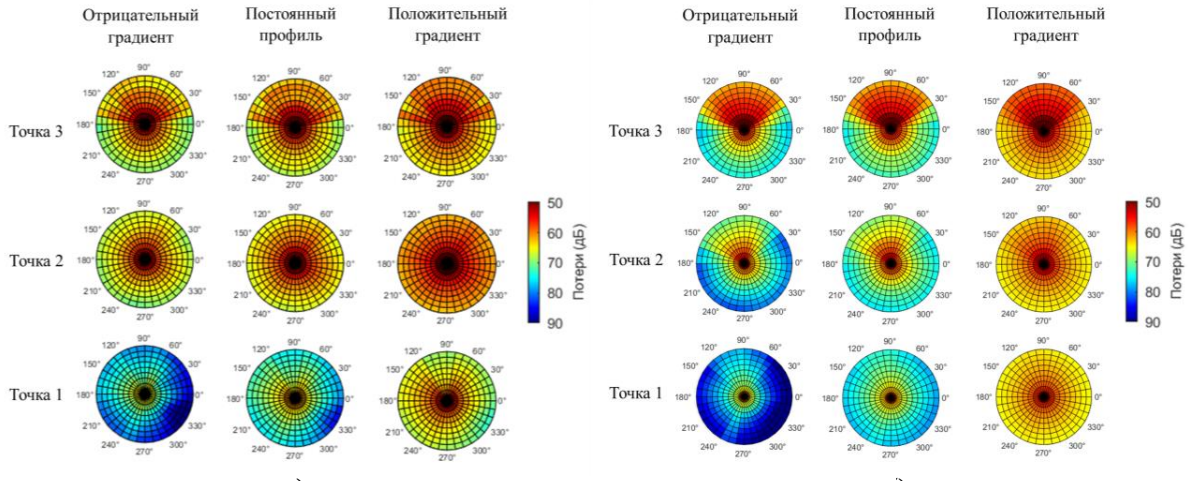


Рис. 3. Распределение средних по глубине потерь при распространении звука $\bar{T}L(r,\varphi)$ в горизонтальной плоскости для частоты 100 Гц (а) и 500 Гц (б).

Для моделирования шумового поля распределённых приповерхностных источников использовалась методика, применявшаяся нами ранее в [5]. Эффективный радиус шумового поля R_{noise} рассчитывался для предельных случаев плоскослоистых волноводов с однородным дном, скорость звука c_b в котором равна 1460 м/с или 1660 м/с, а толщина водного слоя – 28 м или 32 м, соответственно, с учётом дополнительных коэффициентов затухания: в воде и связанного с рассеянием звуковых волн на ветровом волнении. Показано, что R_{noise} не превышает 5 км (R^{max}_{noise} = 4330 м при 100 Гц и положительном градиенте скорости звука). На рис. 4 представлены пространственные характеристики (а) и модовая структура (б) шумового поля ветрового волнения.

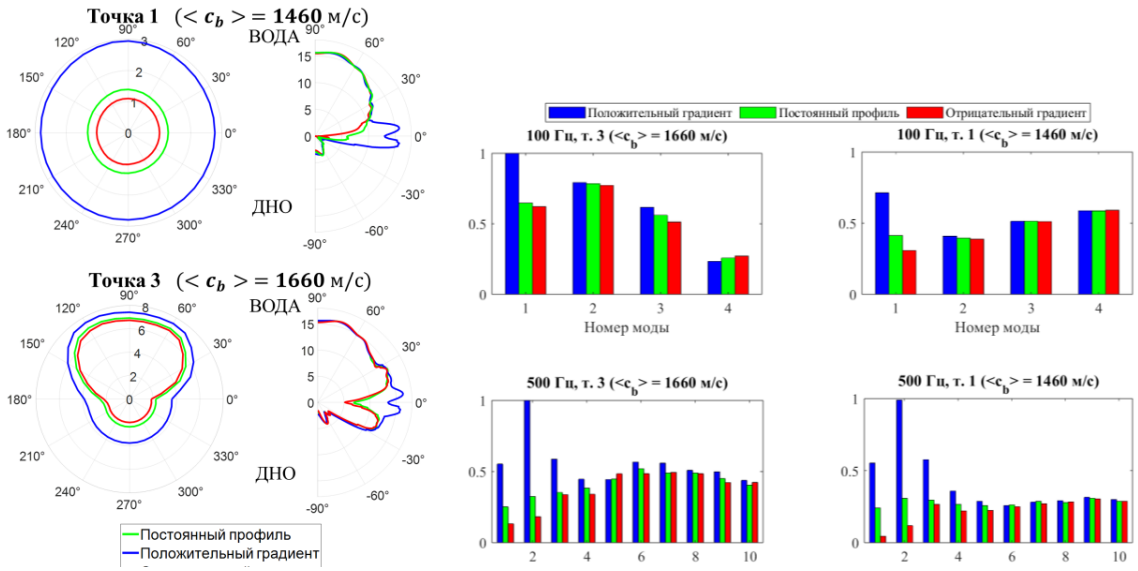


Рис. 4 Нормированные горизонтальные и вертикальные диаграммы направленности при частоте 500 Гц (а) и нормированные на максимум модовые амплитуды шумового поля $|A_m(f)|$ (б).

На участке с известной пространственной и временной зависимостью характеристик волнения представлены усреднённые по глубине и по реализациям поверхности зависимости потерь от расстояния для двух глубин $H = 20$ м и $H = 30$ м и трёх частот: 100, 500 и 1000 Гц (рис. 5). При моделировании глубина источника шума принималась равной $z_s = 6$ м. Рассматривались три режима ветрового волнения, отвечающие спектрам на рис. 1,б. На каждую кривую наложен дополнительно модуль максимального отклонения потерь на расстояниях $r = 300, 2500$ и 5000 м.

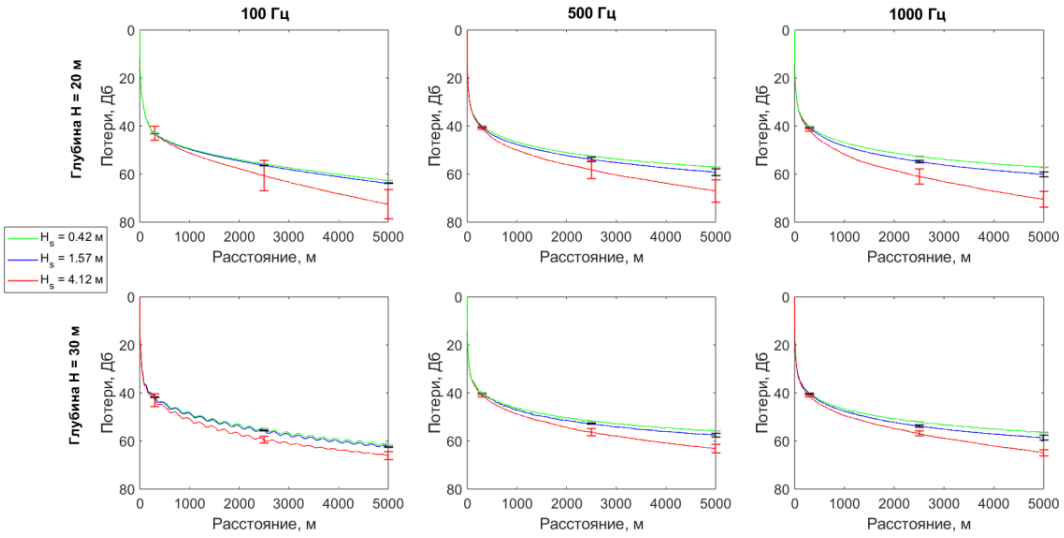


Рис. 5. Усреднённые потери при распространении при разных глубинах водного слоя, частотах и высотах волнения.

Обсуждение

Для волновода с трёхмерно неоднородным дном показано, что смена гидрологических условий существенно влияет на потери при распространении от одиночного приповерхностного источника: на расстоянии 5 км вариации потерь достигают 15 дБ на 100 Гц и 24 дБ на 500 Гц в области, где скорость звука в дне близка к скорости звука в воде. Для распределённых источников ветрового волнения изменчивость среднего уровня шума значительно слабее и обычно не превышает 1–2 дБ, однако заметно перестраиваются пространственная и модовая структуры поля: амплитуды низших мод возрастают в несколько раз, а вертикальные диаграммы направленности отражают перераспределение энергии между придонным и приповерхностным каналами. Горизонтальная направленность при этом в большей степени определяется типом дна и рельефом, чем сезонной изменчивостью гидрологических условий.

Для волновода с заданной пространственно-временной изменчивостью параметров волнения установлено, что влияние поверхностного рассеяния возрастает с частотой и ослабевает с увеличением глубины волновода. При значительной высоте волны 4.12 м дополнительные потери на расстоянии 5 км составляют почти 14 дБ на частоте 1000 Гц при глубине 20 м и не превышают 9 дБ при глубине 30 м. На частоте 100 Гц отклонения отдельных реализаций от среднего достигают 6-7 дБ, что связано с более глубоким проникновением энергии в дно и усилением роли донного поглощения. Продемонстрировано, что влияние поверхности значительно лишь в случае сильного волнения, разница между затуханием при слабом и среднем волнении не превышает 3 дБ на частоте 1000 Гц и глубине волновода 20 м.

Заключение

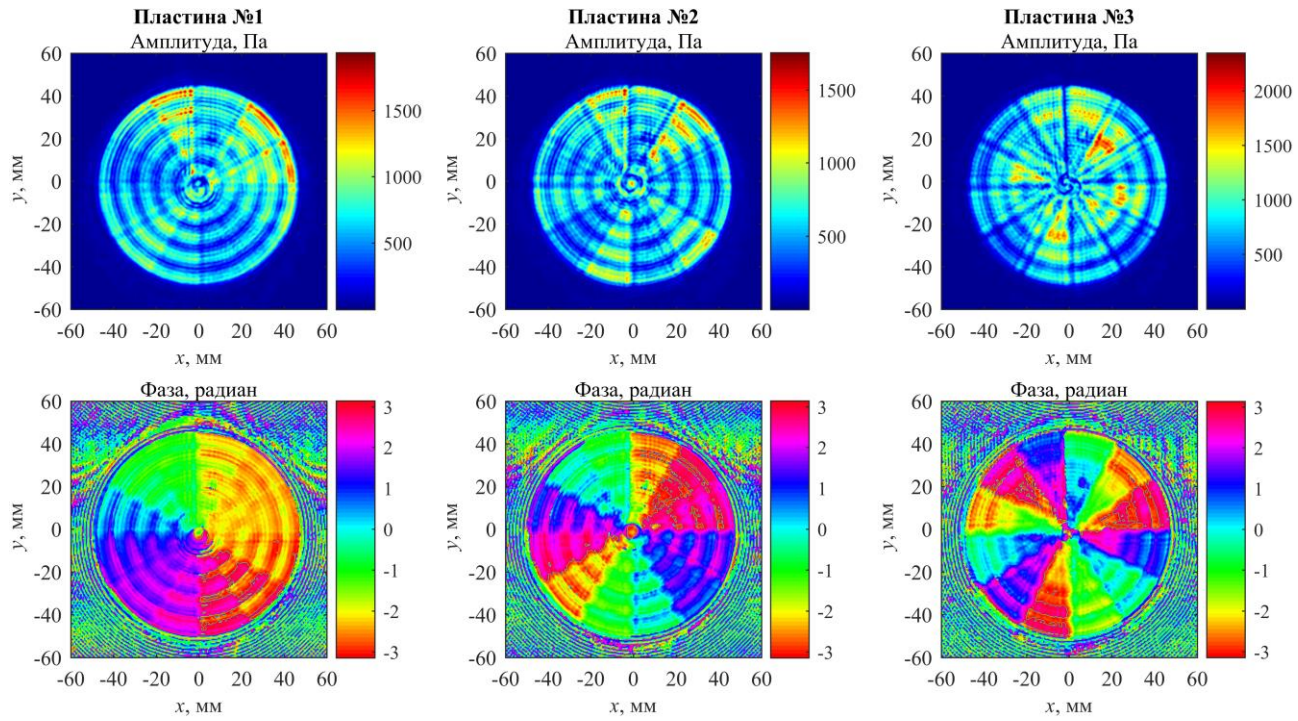
Таким образом, выполненная оценка совместного влияния неоднородного дна, стратификации водного слоя и поверхностного волнения показала, что в исследованных мелководных акваториях Карского моря определяющую роль в формировании акустического ландшафта играют характеристики донных осадков в районе наблюдения. Изменение гидрологических условий в наибольшей степени сказывается на потерях от одиночных источников и на пространственно-модовой структуре шумового поля, тогда как влияние поверхностного волнения наиболее заметно проявляется на высоких частотах и в более мелком волноводе. Полученные результаты могут быть использованы при прогнозе фонового шума и условий распространения низкочастотных сигналов на арктическом шельфе.

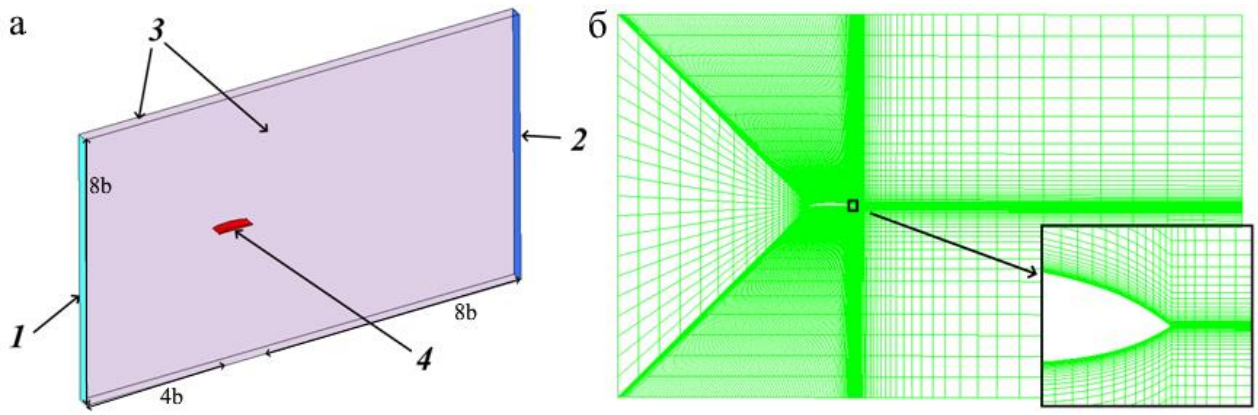
Список литературы

1. *Jianheng L., Tianfu G.* Model of wind-generated ambient noise in stratified shallow water. // Chinese Journal of Oceanology and Limnology. 2005. **23**, N 2. P. 144-151.
2. *Carey W.M., Evans R.B.* Ocean ambient noise: measurement and theory. Springer Science & Business Media. 2011.
3. *Урик Р.Д.* Основы гидроакустики. Л.: Судостроение, 1978.
4. *Norton G.V., Novarini J.C.* The effect of sea-surface roughness on shallow water waveguide propagation: A coherent approach. // Journal of the Acoustical Society of America. 1996. **99**, N 2. P. 748-758.
5. *Боджона С.Д., Сидоров Д.Д., Петников В.Г., Луньков А.А.* Характеристики низкочастотного окружающего шума в мелком море с неоднородной структурой дна. // Акустический журнал. 2025. **71**, № 1. С. 79-87.
6. *Boyer T.P., Baranova O.K., Coleman C., Garcia H.E., Grodsky A., Locarnini R.A., Mishonov A.V., Paver C.R., Reagan J.R., Seidov D.* и др. World Ocean Database 2018. NOAA Atlas NESDIS 87. 2018.
7. Arctic Ocean Waves Analysis and Forecast. E.U. Copernicus Marine Service Information (CMEMS). Marine Data Store.
8. *The WAMDI Group*. The WAM model - a third-generation ocean wave prediction model. // Journal of Physical Oceanography. 1988. **18**. P. 1775-1810.
9. *Луньков А.А., Григорьев В.А., Петников В.Г.* Акустические характеристики морского дна и их влияние на дальнее распространение звука на арктическом шельфе. // Успехи физических наук. 2024. **194**, № 2. С. 184-207.
10. *Collins M.D.* A split-step Pade solution for the parabolic equation method. // Journal of the Acoustical Society of America. 1993. **93**, N 4. P. 1736-1742.
11. *Porter M.* The KRAKEN normal mode program. La Spezia: SACLANT Undersea Research Centre, 1991.

Назад к содержанию секции

СЕКЦИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ АКУСТИКА





назад к Содержанию

СОДЕРЖАНИЕ СЕКЦИИ ФИЗИЧЕСКАЯ АКУСТИКА

1. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДВУМЕРНЫХ ФОКУСИРОВАННЫХ АНТЕННЫХ РЕШЁТОК ДЛЯ ЭХО-ИМПУЛЬСНОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ОБЪЕКТОВ В ЗОНЕ ЭФФЕКТИВНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ФОКУСИРОВКИ
Цысарь С.А., Сапожников О.А. 238

2. АНАЛИЗ ДАННЫХ ДВУМЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПОЛЯ 128-ЭЛЕМЕНТНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЁТКИ В ВОЗДУХЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАКЕТА ОБРАБОТКИ АКУСТИЧЕСКИХ ГОЛОГРАММ “xDDx”
Росницкий П.Б., Лапина А.В., Цысарь С.А., Сапожников О.А. 240

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ЭФФЕКТА ВОЗНИКНОВЕНИЯ РАДИАЦИОННОГО МОМЕНТА СИЛ ПРИ ПАДЕНИИ ЗАКРУЧЕННОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПУЧКА НА ПОГЛОТИТЕЛЬ
Котельникова Л.М., Цысарь С.А., Сапожников О.А. 242

4. ФОРМИРОВАНИЕ КОРОТКОГО АКУСТИЧЕСКОГО ИМПУЛЬСА ПРИ ПОМОЩИ ПОЛУВОЛНОВОГО СОГЛАСУЮЩЕГО СЛОЯ
Макарьев Д.И., Резниченко А.Н., Швецова Н.А.....249

5. НАБЛЮДЕНИЕ СТОЯЧЕЙ ВОЛНЫ ГЕЛИКОИДНОГО ТИПА ПРИ ОБРАЩЕНИИ ВОЛНОВОГО ФРОНТА АКУСТИЧЕСКОГО ВИХРЯ
Крутянский Л.М., Клопотов Р.В. 254

6. ИЗМЕРЕНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОПТИЧЕСКОЙ ТЕОРЕМЫ ДЛЯ РЕЗОНАТОРА ГЕЛЬМГОЛЬЦА
Климов Д.А., Уткин Ю.С., Ермаков С.С., Кузьмин М.В., Игошин В.Д., Петров М.И.....261

7. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УПРУГИХ МОД НА МУЛЬТИПОЛЬНЫЙ ОТКЛИК ЛАБИРИНТНОГО АКУСТИЧЕСКОГО МЕТААТОМА
Тиманкова Ю.А., Смагин М.В., Кузьмин М.В., Ли Юн, Петров М.И. 262

8. РАСПРОСТРАНЕНИЕ КОРОТКОГО АКУСТИЧЕСКОГО ИМПУЛЬСА В СРЕДЕ С ОБОБЩЕННОЙ РЕЗОНАНСНОЙ РЕЛАКСАЦИЕЙ. ТОЧНОЕ АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ
Максимов А.Г., Максимов Г.А. 264

9. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КРОМОЧНОГО ШУМА С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА НА ОСНОВЕ СИНТЕТИЧЕСКОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ
Суворов А.С., Балакирева Н.В., Смирнов С.А., Севрюков О.Ф. 270

10. РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГИДРОУПРУГИХ ПРОЦЕССОВ НА ФОРМИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО КРОМОЧНОГО ШУМА
Суворов А.С., Зайцева С.Г., Стуленков А.В., Вьюшкина И.А. 276

11. АНИЗОТРОПИЯ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В МОНОКРИСТАЛЛАХ ФЕРРОБОРАТА ГОЛЬМИЯ
Турчин П.П., Турчин В.И., Бурков С.И., Гудим И.А., Пляскин М.Е., Чулкова М.Ю.....282

12. ВОЗБУЖДЕНИЕ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В ОБРАЗЦАХ С КУБИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПИЕЙ
Глушков Е.В., Глушкова Н.В., Киселев О.Н. 283

13. ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УПРУГИХ СВОЙСТВ И ПОРИСТОСТИ АЛЮМОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИТОВ
Курашкин К.В.....289

14. ОСОБЕННОСТЬ ЯДЕРНОЙ СПИН-ФОНОННОЙ СВЯЗИ В ВЫСОКООМНЫХ КРИСТАЛЛАХ GaAs
Рочев А.М., Микушев В.М., Чарная Е.В., Нефедов Д.Ю. 297

15. ИЗМЕНЕНИЕ ФАЗОВОГО СОСТАВА ПЛЕНОК ПВДФ И ПВДФ-ТРФЭ ПРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ И МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ
Сороколетова Н.А., Беляев С.Н., Касьянов Д.А., Дерябин М.С., Белов Д.В.....303

16. ХАРАКТЕРИСТИКИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ИМПУЛЬСА, ОТРАЖЁННОГО ОТ ПРЕСНОВОДНОГО И СОЛЁНОГО ЛЬДА В ЛАБОРАТОРНОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ
Титченко Ю.А., Ковалдов Д.А., Караев В.Ю., Мешков Е.М., Лихоманов В.А., Чернов А.В.....309

17. ТРАНСФОРМАЦИЯ ТИПА МОДЫ УПРУГОЙ ВОЛНЫ В СТРУКТУРАХ AL/ ASN/DIAMOND
Бурков С.И., Пляскин М.Е., Турчин П.П., Турчин В.И. 315

18. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ КРИСТАЛЛИТОВ В ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦАХ ПО ИЗОБРАЖЕНИЯМ ВОССТАНОВЛЕННЫМ МЕТОДОМ ЦИФРОВОЙ АПЕРТУРЫ
Базулин А.Е., Базулин Е.Г., Ромашкин С.В., Тихонов Д.С.....316

19. СЕЛЕКТИВНОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ БЕГУЩИХ УПРУГИХ ВОЛН СИСТЕМОЙ ПОЛОСОВЫХ ПЬЕЗОАКТУАТОРОВ
Глушков Е.В., Глушкова Н.В., Халтурина Д.Д. 322

20. ФОРМИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ЭХОСИГНАЛА ПРИ ДЕФОКУСИРОВАНИИ СФЕРИЧЕСКОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ АКУСТИЧЕСКОГО МИКРОСКОПА
Левин В.М., Петронюк Ю.С.....328

21. ВЗАИМОСВЯЗЬ РАССЕЯНИЯ, ПОГЛОЩЕНИЯ, СКОРОСТИ ЗВУКА И ПАРАМЕТРА НЕЛИНЕЙНОСТИ ЖИДКОСТИ С ПУЗЫРЬКАМИ
Буланов В.А., Соседко Е.В.....334

22. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИСПЕРСНОГО СОСТАВА ПУЗЫРЬКОВ ГАЗА В ЖИДКОСТИ
Кожарин Н.Ю., Павлов Г.И., Галеева Л.Х. 340

23. СЛЕПАЯ ДЕКОНВОЛЮЦИЯ ЭХОСИГНАЛОВ, ИЗМЕРЕННЫХ АНТЕННОЙ РЕШЁТКОЙ, ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ ОТРАЖАТЕЛЕЙ СО СВЕРХРАЗРЕШЕНИЕМ
Базулин Е.Г. 346

24. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МОНОКРИСТАЛЛОВ ТЕТРАБОРАТА СВИНЦА
Турчин П.П., Турчин В.И., Бурков С.И., Зайцев А.И., Пляскин М.Е., Чулкова М.Ю. 352

25. АКУСТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПЛАВЛЕНИЯ И КРИСТАЛЛИЗАЦИИ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ СПЛАВОВ ГАЛЛИЙ-СЕРЕБРО В ПОРАХ СИНТЕТИЧЕСКИХ ОПАЛОВ
Абдуламонов Х.А., Пирозерский А.Л., Чарная Е.В. 353

26. ПОРОГИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ И ЛАЗЕРНОЙ КАВИТАЦИИ В ЖИДКОСТИ С ВКЛЮЧЕНИЯМИ С РАЗЛИЧНОЙ СМАЧИВАЕМОСТЬЮ
Буланов В.А., Чудновский В.М. 359

27. ЭМПИРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НЕТКАНЫХ МАТЕРИАЛОВ
Бикмухаметов Ф.Р. 365

28. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПОЛЕЙ СЕКТОРНОГО ФОКУСИРУЮЩЕГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ
Швецов И.А., Луговая М.А., Швецова Н.А., Колпачева Н.А., Рыбянец А.Н. 366

УДК: 534.2. DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39469

Использование двумерных фокусированных антенных решёток для эхо-импульсной ультразвуковой визуализации объектов в зоне эффективной электронной фокусировки

Цысарь С.А.[1,a], Сапожников О.А[1]

[1] *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.*

Тел.: (495) 9392952
E-mail: [a]*sergey@acs366.phys.msu.ru*

Рассматривается применение двумерных многоэлементных фокусированных антенных решеток для реализации метода эхо-импульсной ультразвуковой визуализации объектов внутри зоны активной электронной фокусировки излучателей. Представлены результаты экспериментальных исследований возможностей эхо-импульсной визуализации с использованием фазированной антенны с элементами большой волновой апертуры. Приведены оценки размеров зон формирования изображений и разрешений, достигаемых в условиях узких диаграмм направленности отдельных элементов решетки. С использованием 256-элементной фокусированной мозаичной решетки диаметром 200 мм, фокусным расстоянием 150 мм и центральной частотой 1.2 МГц экспериментально продемонстрирована способность подобного типа устройств формировать качественное изображение тонких металлических объектов размером порядка длины волны используемого излучения в ограниченном объёме пространства вокруг геометрического фокуса излучателя. Дополнительно проводилась визуализация объектов из пластиков PETG и PLA, расположенных друг за другом. Показано, что размеры области визуализации и получаемое разрешение соответствуют теоретическим оценкам, и качество изображения зависит от количества переотражений между визуализируемыми объектами. Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №25-12-00141.

Ключевые слова: Двумерная антенная решетка, электронная фокусировка, ультразвуковая визуализация, эхо-импульсный метод, фазированная антенна

Using two-dimensional focused antenna arrays for pulse-echo ultrasonic imaging of objects in the effective electronic focusing zone

S.A. Tsysar[1,a], O.A. Sapozhnikov[1]

[1] *Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia.*

Tel.: (495) 9392952;

E-mail: [a] sergey@acs366.phys.msu.ru

This paper discusses the use of two-dimensional multi-element focused arrays for implementing a method of pulse-echo ultrasonic imaging of objects within the active electronic focusing zone of transducers. The results of experimental studies of the capabilities of pulse-echo imaging using a phased arrays with large-wave aperture elements are presented. Estimates of the sizes of imaging zones and the resolutions achieved under conditions of narrow beam patterns of individual array elements are presented. Using a 256-element focused mosaic array with a diameter of 200 mm, a focal length of 150 mm, and a center frequency of 1.2 MHz, the ability of this type of device to form high-resolution images of thin metal objects with a size on the order of the wavelength in a limited volume around the geometric focus of the emitter is experimentally demonstrated. Additionally, visualization of PETG and PLA plastic objects placed one after another was performed. It is shown that the dimensions of the imaging zone and the resulting resolution correspond to theoretical estimates, and image quality depends on the number of multiple reflections between the objects being imaged. This work was supported by grant No. 25-12-00141 from the Russian Science Foundation.

Keywords: 2D phased array, electronic focusing, ultrasound imaging, pulse-echo method, fully populated array

PACS: 43.38.−p, 43.35.Yb

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39470

Анализ данных двумерного сканирования ультразвукового поля 128-элементной антенной решётки в воздухе с использованием пакета обработки акустических голограмм “xDDx”

Росницкий П.Б., Лапина А.В., Цысарь С.А., Сапожников О.А.
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва.
Тел.: +7(495)939-29-52
E-mail: pavrosni@yandex.ru

В последнее время наблюдается интерес к применению систем мощного сфокусированного ультразвука килогерцовых частот в воздушной среде. Такие системы имеют потенциал использования для ускорения промышленных процессов, например для пеногашения. В нашей лаборатории был разработан 128-элементный излучатель такого типа, с частотой 35.5 кГц, апертурой и радиусом кривизны порядка 50 см. При разработке проявилась необходимость спектрального анализа распределения колебательной скорости на поверхности излучателя и поля давления в режиме реального времени для оперативного устранения дефектов и модернизации конструкции. Анализ может быть проведен методом акустической голографии, процесс которой представляет собой трудоемкую процедуру, включающую гидрофонные (микрофонные) измерения, обработку большого количества сигналов, и проекцию голограммы на поверхность излучателя и в объем среды. Целью работы было представление полностью автоматического алгоритма сбора и обработки голографических данных в режиме реального времени для сфокусированных излучателей. Алгоритм планировалось создать на основе открытого программного комплекса “xDDx” (https://limu.msu.ru/xDDx), разработанного авторами, который был создан для обработки голограмм с использованием быстрого расчета интеграла Рэлея на видеокартах. Проведена разработка алгоритма и его тестирование на 128-элементной решетке, которое позволило выявить дефекты конструкции и разработать план их устранения. Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №25-12-00141.

*Ключевые слова:*ультразвук низкого диапазона частот, воздушный ультразвук, многоэлементная антенная решетка, высокоинтенсивный фокусированный ультразвук, акустическая голография, программный комплекс

Acoustic Holography Analysis of the Ultrasonic Field From A 128-Element Airborne Array Using the xDDx Toolbox

Rosnitskiy P.B., Lapina A.V., Tsysar S.A., Sapozhnikov O.A.
Faculty of Physics, M.V.Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia.
Phone: +7(495)939-29-52
E-mail: pavrosni@yandex.ru

Recently, there has been significant interest in high-power, focused kilohertz-frequency airborne ultrasound systems, which show potential for accelerating industrial processes such as defoaming. Our laboratory developed a 128-element array operating at 35.5 kHz, featuring an aperture and a radius of curvature of approximately 50 cm. During the development phase, it became necessary to perform spectral analysis of the velocity distribution on the emitter surface and the pressure field in real time to facilitate rapid defect detection and design optimization. This analysis can be implemented using acoustic holography, a process involving microphone measurements, signal processing, and the projection of holograms onto the array surface and into the surrounding medium.

The goal of this work is to present a comprehensive algorithm for the real-time collection and processing of holographic data for focused transducers. The algorithm is based on the open-source toolbox "xDDx" (https://limu.msu.ru/xDDx), developed by the authors for fast processing of holograms via Rayleigh integral calculations on GPUs. The proposed method was tested on a 128-element array, successfully identifying design defects and enabling a strategy for their mitigation.
This work was supported by Russian Science Foundation under Grant 25-12-00141.

Keywords: low-frequency ultrasound, airborne ultrasound, multi-element phased array, high-intensity focused ultrasound (HIFU), acoustic holography, toolbox

УДК: 534.29. DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39471

An experimental study of the effect of the emergence of a radiation torque when a twisted ultrasound beam is incident on an absorber

L.M. Kotelnikova[1,a], S.A. Tsysar[2,b], O.A. Sapozhnikov[1,c]

[1] *Department of Acoustics, Faculty of Physics, M.V. Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia*

[2] *Department of Nanophotonics, Faculty of Physics, M.V. Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia*

E-mail: [a]*kotelnikovalm@my.msu.ru*, [b]*sergey@acs366.phys.msu.ru*, [c]*oleg@acs366.phys.msu.ru*

Abstract: The present work is focused on the investigation of the radiation torque – a phenomenon arising from the transfer of angular momentum of an incident acoustic wave to a scattering or absorbing object. For the generation of torque, the so-called twisted («vortex») wave beams are used, which carry not only energy and linear momentum but also angular momentum. The torque effect enables the rotation of objects located in the beam path. Potential applications of this phenomenon include acceleration of substance dissolution, measurement of the moment of inertia of small particles, and more. Given the development of these applications, there is significant interest in quantitatively studying the ability of ultrasound to exert a twisting effect on various objects, which requires the development of methods for precise torque measurement. This work is devoted to the experimental measurement of the radiation torque exerted by a twisted beam on an extended acoustic absorber. Twisted beams were generated by imposing phase masks on a planar source with a large wave aperture. The fields of twisted beams were investigated by measuring acoustic holograms. Numerical calculations of the radiation torque were performed. An experimental setup for measuring small torques was created. The results of experimental measurements were compared with numerical calculations.

Keywords: radiation torque, absorber.

PACS: 43.25.+y, 43.25.−x, 43.25.Zx

Введение

Общеизвестно, что волны любой природы способны переносить энергию, импульс и момент импульса. Перенос энергии волнами лежит в основе передачи информации на конечные расстояния, а при поглощении энергии средой происходит ее нагрев. Если волна встречает какую-то неоднородность среды или препятствие или среда распространения вязкая, то волна может передавать импульс объекту или самой среде. Согласно второму закону Ньютона, изменение импульса приводит к возникновению силы, действующей на объект или среду, которая называется акустической радиационной силой. Передача момента импульса

от волны объекту, расположенному в среде, приводит к вращению этого объекта (соосно падающей волне), т.е. на объект начинает действовать момент силы (крутящий момент). Предметом настоящей работы является исследование последнего упомянутого здесь явления – передача момента импульса от волны к объекту и возникновение вследствие этого момента силы, действующего на данный объект.

Волны, переносящие не только энергию и импульс, но и момент импульса, получили название закрученных волн. Закрученность волны возникает из-за спиральности ее фазовых фронтов: волновой фронт такой волны словно наматывается винтом на направление распространения волны. Существуют различные степени закрутки такой волны: в зависимости от величины закрутки волновые фронты в общем случае имеют вид нескольких взаимно вложенных винтообразных поверхностей, число которых равно т.н. топологическому заряду m.

Закрученные волны хорошо известны и активно изучаются в оптике с 1990-х годов [1 – 3]. Тщательное изучение закрученных пучков с теоретической, экспериментальной и прикладной точек зрения существенно расширило возможности таких технологий, как оптические ловушки и пинцеты, позволило реализовать оптическое вращение микрообъектов, улучшило методы сортировки частиц и способствовало развитию оптической микрореологии, а также открыло новые направления в микроманипуляции и микромашинах. Пока что не существует повсеместного применения акустических закрученных пучков, но благодаря наличию момента импульса закрученные пучки обладают способностью приводить во вращение небольшие частицы из поглощающего материала, что может использоваться для измерения инерционных свойств частицы (например, момента инерции), для ускорения процесса растворения вещества, для ускорения химических реакций и т.п.

В данной работе исследуются поля закрученных пучков различных топологических зарядов и проведен демонстрационный эксперимент по дистанционному закручиванию поглотителя.

1 Экспериментальное исследование полей закрученных пучков

Для создания закрученных пучков использовались фазовые пластины из оргстекла, разработанные ранее в работе [4], которые накладывались на одноэлементный плоский круглый излучатель диаметром 100 мм с центральной частотой 1.12 МГц. Фазовая пластина отвечает за вращение фазы, т.е. фазовая пластина при прохождении через нее звука за счет неоднородной толщины обеспечивает набег фазы по кругу, кратный 2π, что приводит к формированию закрученного пучка. Всего имелось три фазовые пластины, позволяющие создать фазовую закрутку с топологическими зарядами m = 1,2 и 3 (пластины №1, №2 и №3, соответственно). Соответствующий набег фазы по кругу – 2π, 4π и 6π.

Для характеризации полей закрученных пучков было проведено измерение акустических голограмм [5]. Сначала была измерена голограмма излучателя без фазовой пластины, что позволило охарактеризовать в целом его работу. Затем были проведены аналогичные измерения голограмм с прикрепленными (поочередно) на излучатель фазовыми пластинами.

По результатам измерения акустических голограмм было восстановлено поле на поверхности излучателя на частоте 1.12 МГц (рис. 1), откуда можно сделать следующие выводы. Во-первых, как на распределении амплитуд, так и на распределении фаз, четко выделяются 12 секторов фазовых пластин. Во-вторых, наблюдается закрученность фазы, набег фазы по кругу равен 2π, 4π и 6π для пластин №1, №2 и №3, соответственно. В-третьих, фаза равномерна вдоль каждого сектора (за исключением колец, вызванных волнами Лэмба). В-четвертых, для разных секторов амплитуда прошедшей волны разная, что связано со сложной зависимостью амплитуды прошедшей волны от толщины пластины [6].

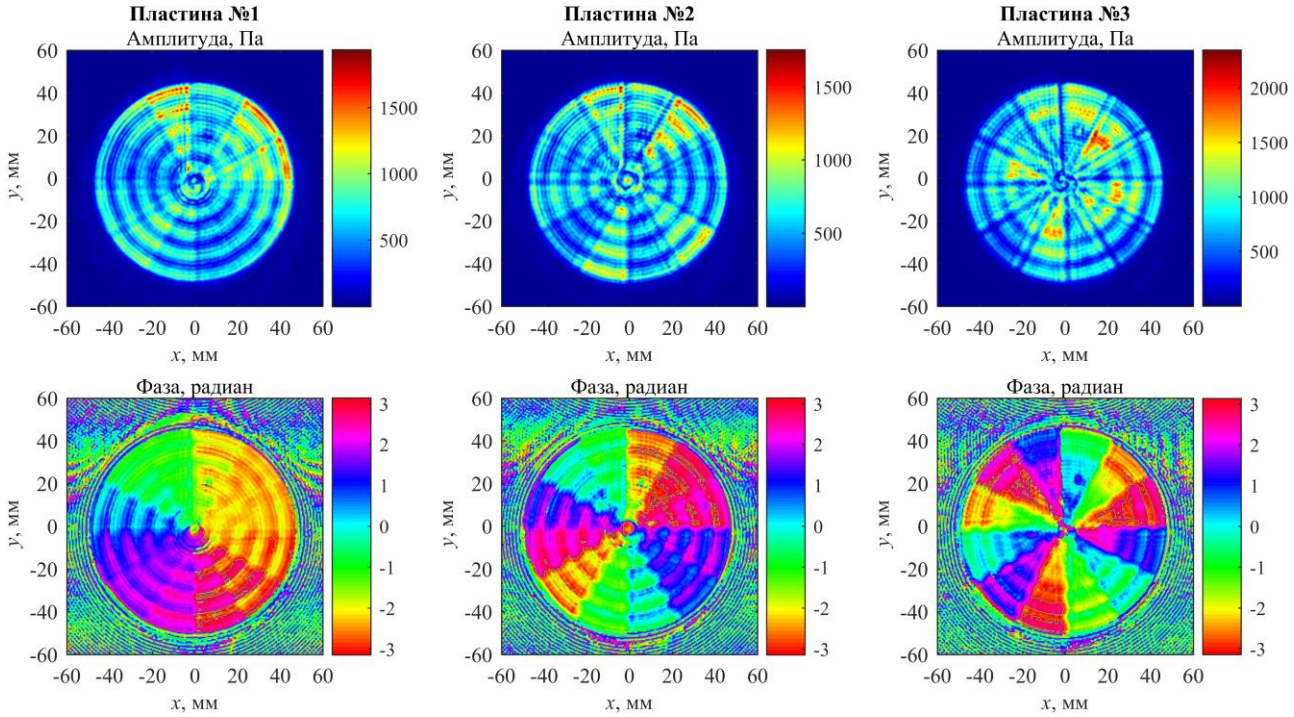


Рис. 1. Восстановление акустического поля на поверхности излучателя с наложенными на него фазовыми пластинами №1, №2 и №3 (слева направо) методом углового спектра на частоте 1.12 МГц: верхний ряд – амплитуда, нижний ряд – фаза.

2 Численный расчет момента силы

Произведем расчет полного момента радиационной силы (полного крутящего момента), действующего на идеальный протяженный поглотитель со стороны закрученного пучка, пространственная структура которого известна из результатов измерения голограммы. Из общих физических соображений момент силы определяется следующим образом [7]:

$$\mathbf{M} = \int_{\Sigma} d\mathbf{M} = \int_{\Sigma} \mathbf{r} \times \frac{d\mathbf{F}}{d\Sigma} d\Sigma \,, \qquad (1)$$

$$\frac{d\mathbf{F}}{d\Sigma}=\left(\frac{\rho|\mathbf{v}|^2}{4}-\frac{|p|^2}{4\rho c^2}\right)\mathbf{n}-\frac{\rho}{2}\mathrm{Re}\left[\mathbf{v}^*\left(\mathbf{v}\cdot\mathbf{n}\right)\right]. \quad (2)$$

Здесь $d\mathbf{F}$ – акустическая радиационная сила, действующая на бесконечно малый элемент $d\Sigma$ поверхности поглотителя Σ, подверженной воздействию акустического пучка, $\mathbf{r}=(x,y,z)$ – радиус-вектор (пусть начало координат расположено в центре излучающей поверхности), p и $\mathbf{v}$ – комплексные амплитуды акустического давления и колебательной скорости, заданные на поверхности Σ и состоящие из суперпозиции соответствующих величин падающего и рассеянного полей, ρ и c – плотность жидкости и скорость звука в ней, $\mathbf{n}$ – внешняя нормаль к элементу поверхности $d\Sigma$, звездочка означает комплексное сопряжение величины.

Подставляя (2) в (1), с учетом, что $\mathbf{n}=(0,0,-1)$ – это внешняя нормаль к поверхности поглотителя (располагается всегда соосно оси z), получаем следующее выражение для z-компоненты вектора момента сил $\mathbf{M}$:

$$M_z=\frac{\rho}{2}\mathrm{Re}\left\{\int_\Sigma d\Sigma\left(xv_y^*-yv_x^*\right)v_z\right\}. \quad (3)$$

В этом выражении (v_x,v_y,v_z) – декартовы компоненты комплексной амплитуды колебательной скорости на поверхности поглотителя $\mathbf{v}$. Компоненты колебательной скорости рассчитывались из данных акустической голограммы. Компонента M_z вектора момента сил (3) отвечает за искомое вращение поглотителя в направлении, соосном падающему акустическому пучку.

На рис. 2 приведены результаты численных расчетов момента силы. На графиках изображена зависимость момента силы от частоты падающего монохроматического пучка с разной нормировкой.

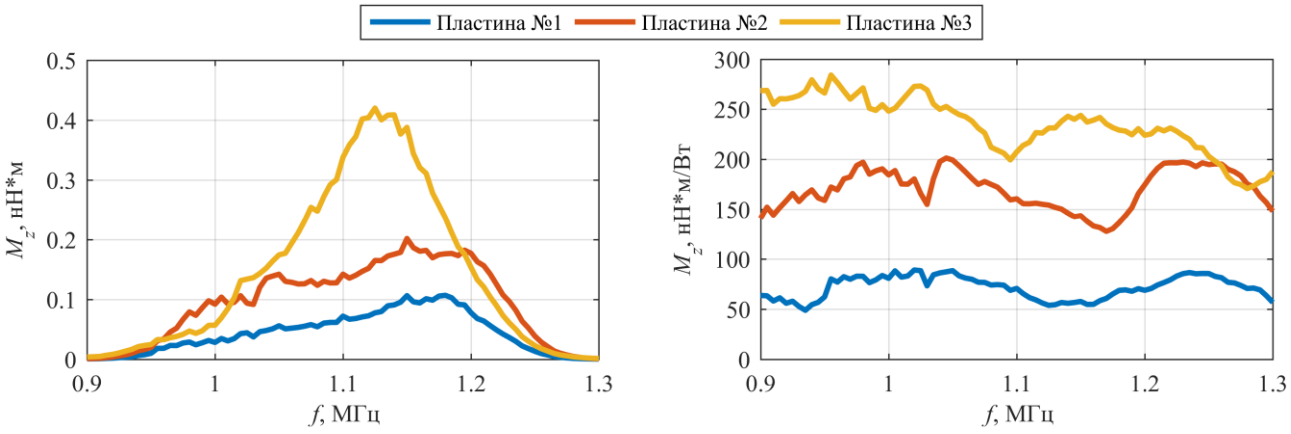


Рис. 2. Результаты численных расчетов z-компоненты момента силы, действующего на идеальный протяженный поглотитель, по результатам измерения акустической голограммы в зависимости от частоты падающей волны f. Слева: момент силы при подаче сигнала амплитудой 1 В на излучатель. Справа: момент силы при акустической мощности падающего на поглотитель акустического пучка 1 Вт.

Слева на рис. 2 приведены результаты расчетов при амплитуде сигнала на излучателе 1 В: чем более закрученный пучок (чем больше топологический заряд), тем больше момент силы. С другой стороны, известно, что при заданной мощности волны крутящий момент прямо пропорционален топологическому заряду. Поэтому справа на рис. 2 график приведен для момента силы, нормированного на полную акустическую мощность падающего на поглотитель акустического пучка. Момент силы, действующий на поглотитель со стороны закрученных пучков с топологическими зарядами m = 1, 2 и 3, должен относиться как 1:2:3. Данное соотношение можно приблизительно наблюдать для кривых на рис. 2 справа. Есть некоторые отклонения от данного соотношения, которые связаны с тем, что способ создания закрученных пучков неидеальный: толщина фазовой пластины по кругу меняется не непрерывно, а скачками. Свой вклад также дает тот факт, что амплитуда прошедшей волны сложным образом зависит от толщины [6]. В результате соотношение 1:2:3 выполняется лишь приближенно.

3 Экспериментальное исследование крутящего момента

В емкость 300×300×300 мм с дегазированной водой помещался плоский излучатель диаметром 100 мм с наложенной на него фазовой пластиной. Ось создаваемого акустического пучка была направлена вертикально вверх. С генератора (Agilent 33250A, Agilent Technologies, США) через усилитель электрической мощности (210L, Electronics & Innovation, США) на излучатель подавался непрерывный гармонический сигнал на частоте 1.12 МГц. На некотором расстоянии от излучателя (около 5 см) соосно излучаемому акустическому пучку располагался акустический поглотитель диаметром 200 мм (HAM-A, Precision Acoustics, США). Поглотитель был жестко закреплен в кольцеобразной конструкции, подвешенной на кварцевой нити (диаметром около 100 мкм). Был проведен эксперимент, во время которого поглотитель приводился в движение и поворачивался на фиксированный угол под действием момента силы закрученного пучка. Было проверено, что угол закрутки зависит от мощности сигнала, подаваемого на излучатель: при увеличении мощности, подаваемой на излучатель, угол поворота пропорционально увеличивался.

Заключение

Созданы закрученные пучки различных топологических зарядов путем наложения фазовых пластин на плоский излучатель. Исследованы поля закрученных пучков путем измерения акустических голограмм. Экспериментально исследована способность закрученного пучка мегагерцового диапазона частот дистанционно поворачивать поглотитель на фиксированный угол. Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 25-12-00141.

Список литературы

1. *Allen L., Beijersbergen M.W., Spreeuw R.J.C., Woerdman J.P.* Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes // Phys. Rev. A. 1992. **45**, N 11. P. 8185.
2. *Soskin M.S., Gorshkov V.N., Vasnetsov M.V., Malos J.T., Heckenberg N.R.* Topological charge and angular momentum of light beams carrying optical vortices // Phys. Rev. A. 1997. **56**, N 5. P. 4064.
3. *Padgett M., Courtial J., Allen L.* Light's Orbital Angular Momentum // Phys. Today. 2004. **57**, N 5. P. 35.
4. *Терзи М. Е., Цысарь С.А., Юлдашев П.В., Карзова М.М., Сапожников О.А.* Получение закрученного ультразвукового пучка с помощью фазовой пластины с угловой зависимостью толщины // Вестник МГУ. Серия 3: Физика, астрономия. 2017. № 1. С. 58.
5. *Sapozhnikov O.A., Tsysar S.A., Khokhlova V.A., Kreider W.* Acoustic holography as a metrological tool for characterizing medical ultrasound sources and fields // J. Acoust. Soc. Am. 2015. **138**, N 3. P. 1515.
6. *Бреховских Л.М.* Волны в слоистых средах. Наука. М., 1973.
7. *Терзи М. Е., Цысарь С.А., Юлдашев П.В., Сапожников О.А.* Теоретический анализ крутящего момента, оказываемого закрученным ультразвуковым пучком на расположенный в жидкости поглотитель // Учёные записки физического факультета МГУ. 2017. № 5. С. 1751313.

УДК 534.7; 534.292 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39472

Формирование короткого акустического импульса при помощи полуволнового согласующего слоя

Д.И. Макарьев*, А.Н. Резниченко, Н.А. Швецова

Южный федеральный университет, Научно-исследовательский институт физики, 344090, Ростов-на-Дону, Россия

*E-mail: *dimakaryev@sfedu.ru*

Аннотация: Исследован механизм формирования короткого импульсного ультразвукового сигнала при использовании преобразователя с полуволновым согласующим слоем. Для генерации коротких ультразвуковых импульсов обычно применяются широкополосные ультразвуковые преобразователи, имеющие низкодобротный активный элемент, акустически согласованный демпфер и один или несколько согласующих слоев. Обычно применяются четвертьволновые просветляющие согласующие слои, принцип действия которых основан на взаимной компенсации волн, отраженных от границ разделения материалов элемент-слой и слой-среда распространения. Если четвертьволновый слой заменить полуволновым, то при правильном подборе акустического сопротивления слоя можно добиться обратного эффекта. Такой слой будет обладать запирающим действием, то есть будет препятствовать распространению ультразвукового сигнала в среду. И этот эффект будет действовать для всех периодов волнового пакета кроме первого, поскольку отраженная от границы слой-среда волна не успевает скомпенсировать первый период. Таким образом можно сформировать короткий импульс длительностью в один период. Были определены основные параметры конструкции и физические характеристики ультразвукового преобразователя с полуволновым согласующим слоем.

Ключевые слова: ультразвуковой преобразователь, полуволновой согласующий слой, короткий акустический импульс, акустический импеданс, отражение волны, широкополосный преобразователь.

Formation of a short acoustic pulse using a half-wave matching layer

D.I. Makarev*, A.N. Reznichenko, N.A. Shvetsova

Research Institute of Physics, Southern Federal University, Rostov-on-Don, 344090, Russia

*E-mail: *dimakaryev@sfedu.ru*

Abstract: The mechanism of short pulsed ultrasonic signal formation using a transducer equipped with a half-wave matching layer has been investigated. Broadband ultrasonic transducers featuring a low-Q active element, an acoustically matched backing layer, and one or several matching layers are typically employed to generate short ultrasonic pulses. Quarter-wave anti-reflective matching layers are commonly used; their operating principle is based on mutual compensation of waves reflected from the interfaces between the active element and the matching layer, and between the matching layer and the propagation medium.

If the quarter-wave layer is replaced by a half-wave layer, the opposite effect can be achieved with proper selection of the layer's acoustic impedance. Such a layer exhibits a blocking effect, i.e., it impedes the propagation of the ultrasonic signal into the medium. This effect applies to all cycles of the wave packet except the first one, since the wave reflected from the layer–medium interface does not have sufficient time to cancel the first cycle. Thus, a short pulse with a duration of a single cycle can be generated. The key design parameters and physical characteristics of an ultrasonic transducer with a half-wave matching layer have been determined.

Keywords: ultrasonic transducer, half-wave matching layer, short acoustic pulse, acoustic impedance, wave reflection, broadband transducer.

PACS: 87.19.Xx; 87.80.−y; 43.35.Yb

Введение

Ультразвуковые устройства на основе активных материалов находят широкое применение в различных отраслях техники [1, 2]. В ряде случаев их используют для ультразвукового сканирования, которое активно используется в таких отраслях как медицинская диагностика [3], дефектоскопия [4] и гидроакустика. Ультразвуковое сканирование характеризуется двумя основными параметрами. Это точность и глубина сканирования. Оба этих параметра зависят от частоты ультразвукового сигнала. Однако если точность требует повышения частоты сигнала, поскольку при этом снижается длина волны, то глубина сканирования, напротив, растет при понижении частоты сканирующего

ультразвукового сигнала, поскольку его затухание растет при повышении частоты. Таким образом, можно утверждать, что к сканирующим ультразвуковым преобразователям предъявляются противоречивые требования и разрешение этого противоречия зависит от конкретных условий применения. Например, для гидроакустических применений характерны большие глубины сканирования, поэтому там используются низкочастотные преобразователи, которые излучают и принимают радиоимпульсные сигналы с большим числом периодов.

В то же время для таких применений как медицинская диагностика и дефектоскопия характерны низкие глубины сканирования и высокие требования к разрешающей способности прибора, которые сказываются на характеристиках преобразователя. В частности, повышение разрешающей способности сигнала без снижения его частоты часто реализуется за счет сокращения числа периодов в сканирующем сигнале. Сейчас это число сокращено до предела и обычно устройства работают коротким импульсом, который возбуждается меандром или полупериодом синусоидального сигнала. Но работа таким импульсом выдвигает особые требования к характеристикам ультразвукового преобразователя.

Как известно, одиночный короткий импульс состоит из непрерывного спектра гармоник, и полоса пропускания преобразователя должна обеспечивать прохождения всех этих гармоник с минимальными искажениями, а значит на всей полосе пропускания должны отсутствовать паразитные моды колебаний, которые способны исказить форму спектра, а значит и форму самого сигнала.

1 Объекты исследования

Для создания широкополосных ультразвуковых преобразователей, работающих на воду или среды с близким к воде акустическим сопротивлением, обычно в качестве активного элемента используют анизотропную низкодобротную пьезокерамику. При этом тыльную часть элемента обычно снабжают тяжелым демпфером с высоким акустическим сопротивлением и большим затуханием ультразвука. На рабочую поверхность наносят один или несколько согласующих четвертьволновых слоев. Принцип действия четвертьволнового слоя заключается в том, что отраженная от поверхности слой-среда волна приходит на поверхность слой-элемент в противофазе с волной, отраженной от этой поверхности. При этом волны взаимно компенсируют друг друга и энергии ультразвукового излучения ничего не остается кроме как пройти в среду излучения без больших потерь. Естественно, акустическое сопротивление согласующего слоя нужно подобрать таким образом, чтобы амплитуды указанных волн были примерно равны.

Если же четвертьволновой слой заменить полуволновым и нужным образом подобрать его акустическое сопротивление, то такой слой окажется не просветляющим, а наоборот,

запирающим и будет препятствовать прохождению ультразвукового сигнала в среду. Этот принцип будет работать для всех периодов ультразвукового сигнала кроме первого, так как отраженная от поверхности слой-среда волна не успевает скомпенсировать первый период сигнала. Соответственно получается, что снабженный полуволновым слоем преобразователь будет излучать только первый период сигнала. То есть таким образом можно создать импульсный ультразвуковой преобразователь, излучающий короткий сигнал, длительностью один период.

Нами были изготовлены экспериментальные образцы таких преобразователей. В качестве активного элемента мы использовали пористую пьезокерамику марки ПКР-1 с волновым сопротивлением $20 \cdot 10^6$ кг/(м^2·с) и механической добротностью менее 25 [5, 6]. Демпфер был изготовлен из эпоксидного компаунда на основе вольфрамового порошка. Полуволновой слой – из эпоксидно-диановой смолы ЭД-20 с наполнителем из оксидов цинка, железа и свинца. Рабочая частота пьезоэлемента составляла 5 МГц, диаметр 12 мм. Кроме того, для сравнения были изготовлены аналогичные преобразователи с четвертьволновым согласующем слоем.

2 Экспериментальные результаты и обсуждение

Формы сигналов, полученных от преобразователей с полуволновым и четвертьволновым согласующими слоями, представлены на рисунке 1.

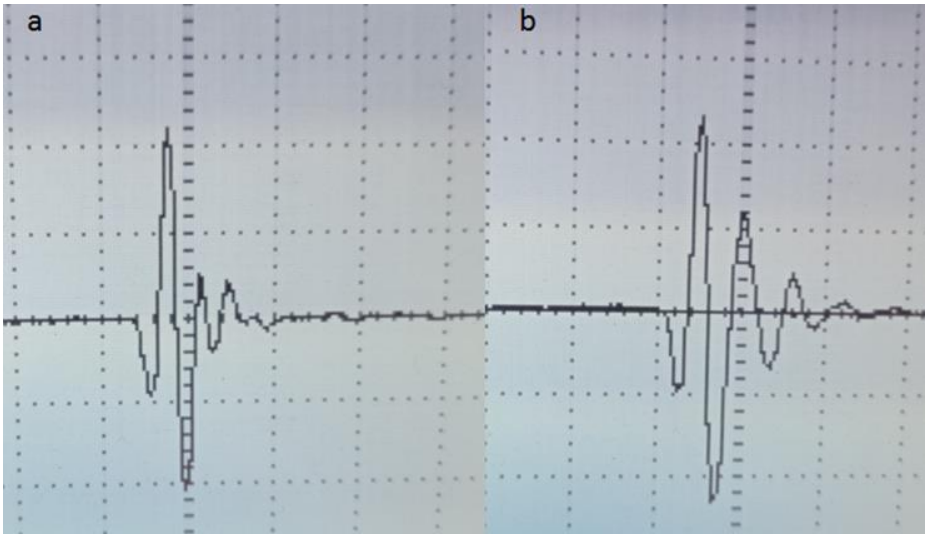


Рис. 1. Формы отраженных от плоской поверхности эхо-сигналов от преобразователя с полуволновым (*a*) и четвертьволновым (*b*) согласующими слоями.

Из рисунка видно, что длительность сигнала от преобразователя с полуволновым согласующим слоем (рис. 1, *a*) меньше, чем у аналогичного преобразователя с четвертьволновым слоем (рис. 1, *b*).

Это говорит о том, что полуволновый слой препятствует прохождению в среду распространения всех периодов волнового пакета, кроме первого. Также из рисунка 1 видно, что данный механизм не полностью компенсирует прохождение сигнала в среду, поэтому длительность УЗ-импульса превышает один период. Это может быть связано, во-первых, с несовершенством акустического согласования слоя со средой распространения и активным элементов преобразователя и, во-вторых, с тем фактом, что импульсный сигнал представляет собой совокупность множества гармоник, а полуволновый слой является таковым только для одной гармоники (центральной частоты сигнала), для остальных он отличается от полуволнового.

Заключение

Таким образом, можно утверждать, что согласование ультразвукового импульсного преобразователя полуволновым слоем способно обеспечить необходимую длительность сканирующего сигнала.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности. Проект № FENW-2026-0022). Использовано оборудование Центра коллективного пользования НИИ физики Южного федерального университета «Электромагнитные, электромеханические и тепловые свойства твердых тел».

Список литературы

1. *Агранат Б.А.* Основы физики и техники ультразвука. Медиа, М., 1987. 257 с.
2. *Бергман Л.* Ультразвук. Издательство иностранной литературы, М., 1957. 179 с.
3. *Лебедев А.Н., Романов М.В*. Ультразвуковая диагностика: основы и современные технологии. Уральский университет, Екатеринбург, 2016. 180 с.
4. *Смирнов А.А*. Акустическая дефектоскопия: теория и практика. Издательство Политехнического университета, Санкт-Петербург, 2015. 250 с.
5. *Newton A.* Advances in porous ceramics. Nova Science Publishers Inc., NY, 2017.
6. *Rybyanets A.N*. Porous piezoceramics: theory, technology, and properties // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. 2011. **58**, P. 1492.

УДК: 534.2. DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39473

Наблюдение стоячей волны геликоидного типа при обращении волнового фронта акустического вихря

Л.М. Крутянский[a], **Р.В. Клопотов**[b]
Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, 119991, Россия
e-mail: [a]leonid.krut@kapella.gpi.ru ,[b]roman@autodela.ru

Аннотация: Экспериментально реализовано обращение волнового фронта акустического вихря. Падающий вихревой ультразвуковой пучок создавался в воде с помощью сферически сфокусированного излучателя и диска переменной толщины, вносящего азимутальный фазовый сдвиг. Встречный вихрь генерировался за счет параметрического обращения волнового фронта падающего пучка. Измерены распределения поля звукового давления в продольном и поперечном сечении падающей и обращенной волн вблизи фокуса излучателя и продемонстрировано их взаимное соответствие. Показано, что оба пучка действительно являются вихревыми и имеют одинаковую хиральность. В области наблюдения пучки полностью встречные – волновые вектора в них противонаправлены. При суперпозиции падающего и обращенного вихревых пучков вблизи фокуса может быть получена стоячая волна с узловой поверхностью в виде геликоида.

Ключевые слова: акустический вихрь, стоячая спиральная волна, обращение волнового фронта

Observation of a standing helicoidal wave using front reversal of an acoustic vortex

L. M. Krutyansky[a], **R. V. Klopotov**[b]
Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia
e-mail: [a]leonid.krut@kapella.gpi.ru ,[b]roman@autodela.ru

Abstract: Wave front reversal of an acoustic vortex is obtained experimentally. The incident vortex beam was produced in water using a focused source and a disc introducing azimuthal phase shifting. The opposite vortex was generated due to parametric wave phase conjugation of the incident beam. Sound pressure distributions are measured in longitudinal and transversal cross-sections of the incident and the conjugate wave fields near the focus, and the mutual correspondence is demonstrated. It is shown that the both beams are vortical and have the same chirality. In the observation area the beams are completely opposite – their wave vectors are

opposite. When the beams are superimposed near the focal area a standing wave with the nodal surface of helicoidal shape can be obtained.

Keywords: acoustical vortex, standing spiral wave, wave phase conjugation

PACS: 43.35.−c

1. Введение

Геликоидальные пучки (акустические вихри) широко используются в последние годы для бесконтактного манипулирования объектами. Фаза волны в таких пучках имеет азимутальную зависимость в плоскости, нормальной к оси распространения, волновой вектор содержит тангенциальную компоненту, и волна кроме импульса несет также и вращательный момент. Звуковое давления в акустическом вихре имеет минимум на оси, что позволяет осуществлять захват и контролируемое перемещение отдельных частиц, взвешенных в жидкости, реализуя т.н. акустический пинцет (см. [1-3]).

Примером акустического вихря, однородного вдоль оси распространения, является пучок, пространственная часть потенциала скорости в котором имеет в комплексном представлении вид функции Бесселя порядка выше нулевого [4]:

$$\phi(r,\varphi,z) = \phi_0 J_m(k_r r) e^{i(m\varphi + k_z z)} \ , \qquad (1)$$

где r,φ,z – цилиндрические координаты, ϕ_0 – действительная амплитуда, J_m – функция Бесселя целого порядка $|m|>0$, k_r и k_z – радиальное и осевое волновые числа соответственно, $k_r^2+k_z^2=\omega^2/c_0$, ω - круговая частота, c_0- скорость звука. Число m называют топологическим зарядом вихря.

Сферически сфокусированный акустический вихрь может быть описан через сферические функции [5]:

$$\phi^*(R,\theta,\varphi) = A_0 h_l(kR) P_l^m(\cos(\theta)) e^{-im\varphi} \qquad (2)$$

где R,θ,φ – сферические координаты, A_0 – действительная амплитуда, h_l –сферическая функция Ханкеля первого рода, P_l^m – ассоциированный полином Лежандра степени l порядка m ($-l \le m \le l$), $k=\omega/c_0$, символ * обозначает комплексное сопряжение.

Циркулярную зависимость фазы в генерируемом пучке можно обеспечить различными способами: активной матрицей излучателей [1-3], диском с переменной по углу толщиной [6], излучателем в виде спирали Ферма-Архимеда [5] и др. Обзор некоторых способов реализации вихревых ультразвуковых пучков приведен в [7].

До настоящего времени у авторов нет сведений о реализации встречного акустического вихря той же хиральности, что и падающий. Интерференция таких встречных пучков должна приводить к стоячей волне геликоидной формы с минимумом на оси, что может иметь как

фундаментальный, так и прикладной интерес. В настоящей работе встречный акустический вихрь производится за счет генерации волны с обращенным фронтом, что автоматически решает проблему воспроизведения распределения поля падающей волны.

Эффективным способом обращения волнового фронта (ОВФ) является запороговое параметрическое взаимодействие ультразвука с полем электромагнитной накачки в поликристаллическом магнитострикционном феррите [8], обеспечивающее амплитуды, соизмеримые с амплитудой падающей волны или превышающие ее [9]. Таким образом, могут быть созданы условия для образования стоячей волны, в том числе, и в случае падающего поля сложной топологии типа акустического вихря.

2. Метод и результаты

Упрощенная схема эксперимента представлена на рис. 1. В качестве падающей волны использовался распространяющийся в воде сфокусированный вихрь. Генерация вихря

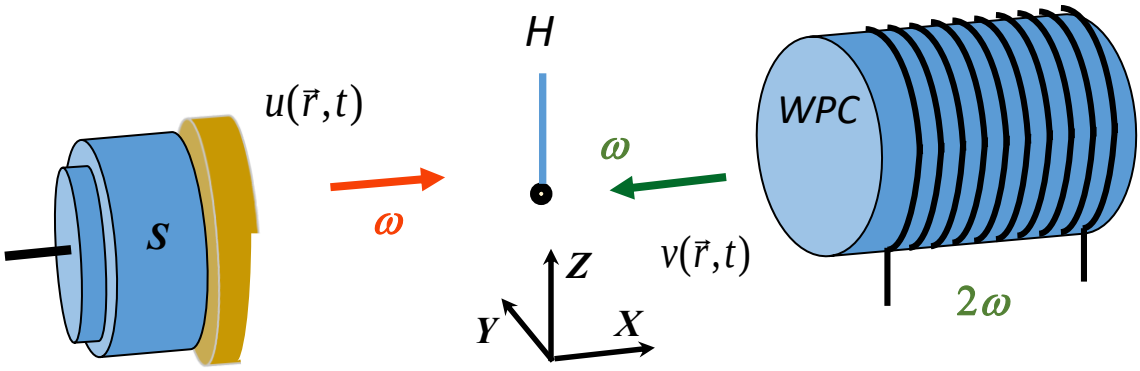


Рис. 1. Схема эксперимента. *S* –излучатель с фазовым диском, *u(r,t)* - излучаемое вихревое поле, *WPC* – параметрическое устройство ОВФ, *v(r,t)* - обращенная волна. *H* – измерительный гидрофон, стрелками условно показано направление распространения волн.

обеспечивалась комбинацией сферически сфокусированного излучателя и полимерного фазового диска с переменной по азимутальному углу φ толщиной, размещенного вплотную к излучателю аналогично методике работы [5]. Фокусное расстояние излучателя составляло 73 мм, диаметр 24 мм. Рабочая частота f=4.1 МГц была выбрана так, чтобы с учетом разницы скоростей звука в воде и в диске вносимый переменный фазовый сдвиг равнялся углу φ (заряд m=1). Длительность излучаемого сигнала составляла около 20 мкс.

Излучатель был помещен в водный бассейн на расстоянии 140 мм от устройства ОВФ. Входная апертура устройства составляла 36 мм, генерируемая им обращенная волна распространялась назад к излучателю. Принцип работы параметрического устройства ОВФ с

накачкой переменным магнитным полем подробно изложен, например, в [8]. Измерение амплитуды и фазы звукового давления производилось звукопрозрачным PVDF гидрофоном. Начало координат лабораторной системы соответствовало точке фокуса сферического излучателя.

Для получения стоячей волны вслед за первым цугом падающей волны излучался второй цуг той же частоты, а его задержка подбиралась таким образом, чтобы он проходил через фокальную область одновременно со встречным вихрем, полученным при ОВФ первого цуга. Амплитуда поля давления во втором падающем импульсе настраивалась равной амплитуде в обращенном пучке.

Результаты экспериментов представлены на рис. 2 - рис. 4. На рис. 2 показаны распределения

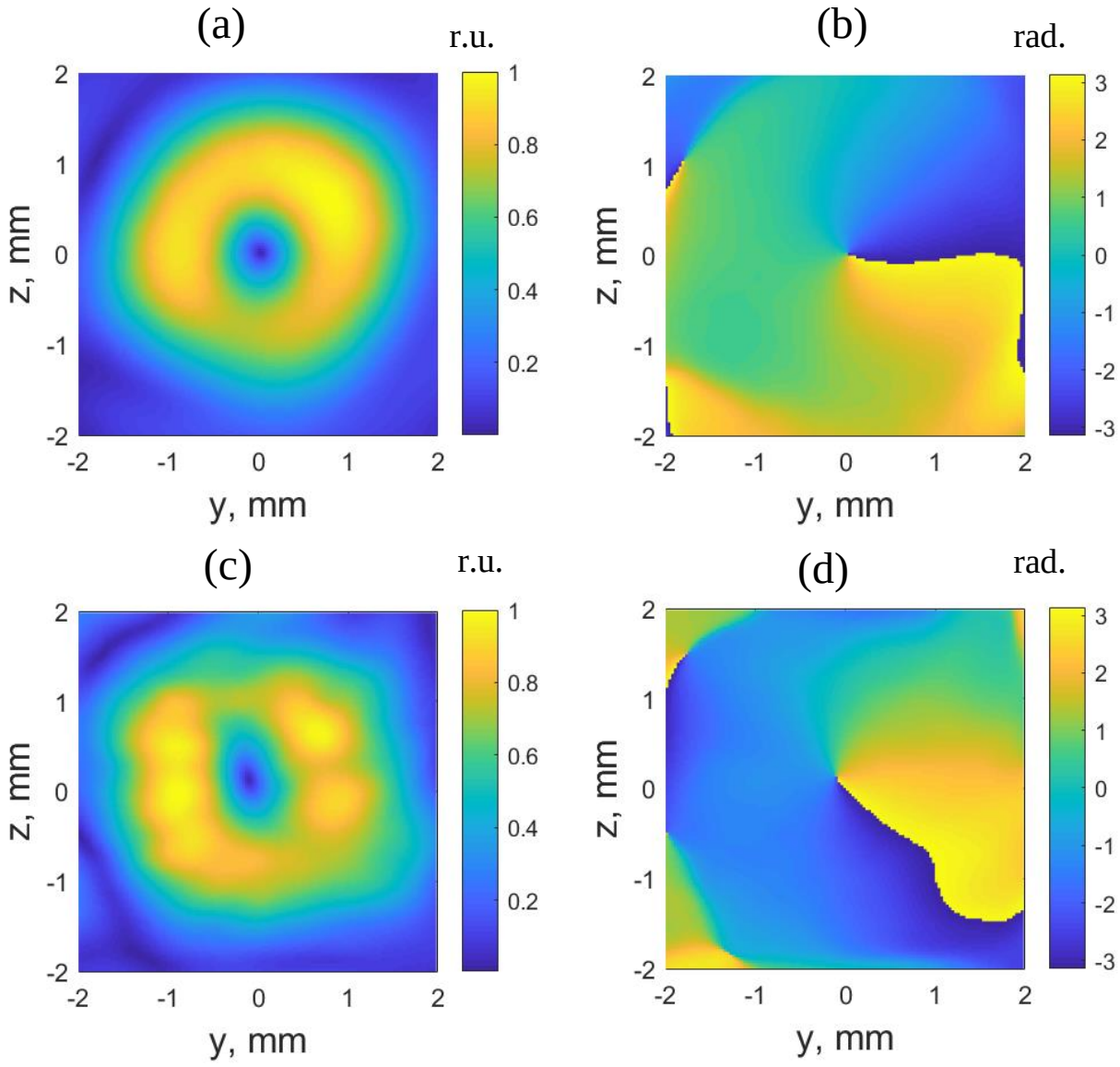


Рис. 2. Измеренные распределения нормированных амплитуд (*a*,*c*) и фаз (*b*,*d*) давления в фокальной плоскости излучателя в падающем и обращенном пучках. *a*, *b* – падающий пучок, *c*,*d* – обращенный пучок.

амплитуд и фаз давления в падающем и обращенном пучках в поперечном сечении в фокальной плоскости x=0. Как и ожидалось, падающий пучок имеет минимум амплитуды на оси, а поле амплитуды обращенного пучка качественно воспроизводит падающий пучок. Наблюдаемые распределения фазы с монотонным изменением значения по углу φ подтверждают, что полученные поля являются вихревыми, а их сравнение демонстрирует противоположность направлении вращения. Небольшие видимые различия распределений объясняются погрешностями работы устройства ОВФ.

Распределения фазы в продольном сечении пучков в небольшой области вблизи фокуса изображены на рис. 3, где видна характерная для бесселевых пучков первого порядка антисимметрия - противофазность поля по разные стороны от оси.

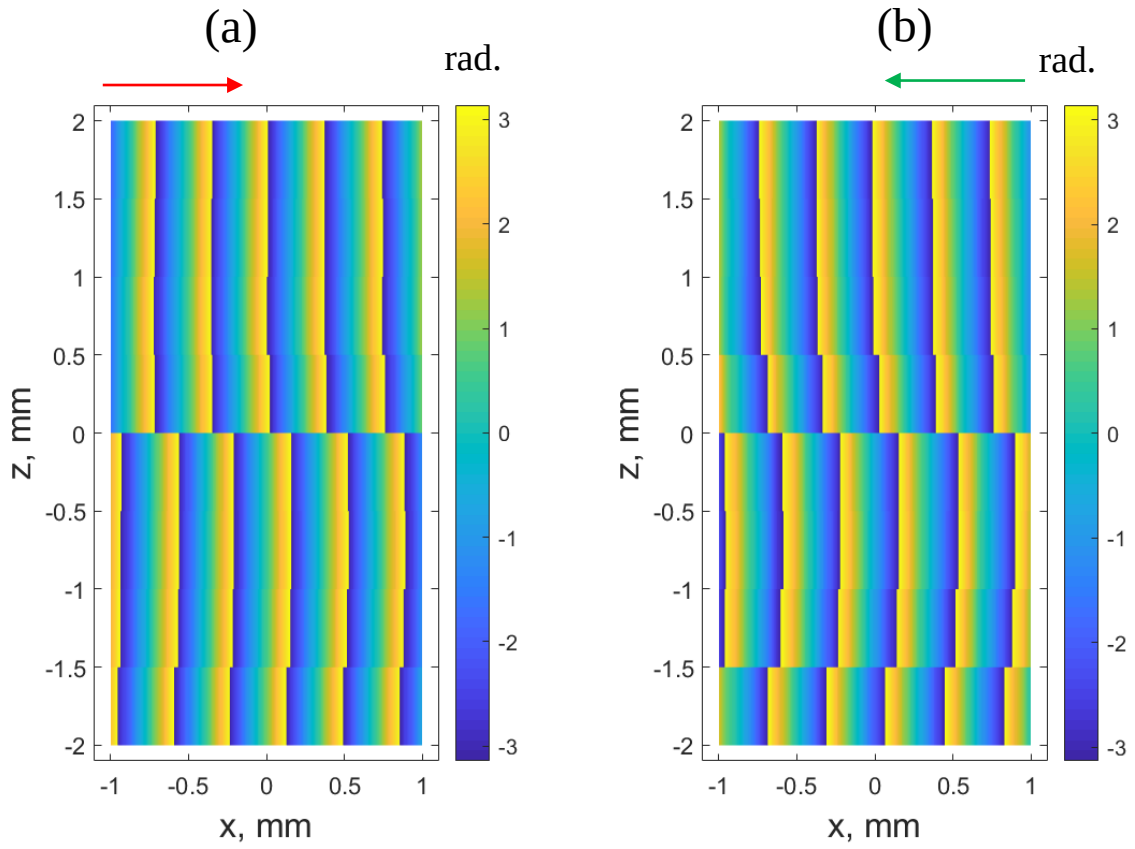


Рис. 3. Фаза звукового давления в продольном сечении (y=0) в небольшой области вблизи фокуса. *a*– падающий пучок, *b* – обращенный пучок. Стрелки показывают направление распространения волн

В силу произвольности ориентации излучателя по углу φ относительно плоскости сечения очевидно, что наблюдаемые фронты являются спиральными. Сравнение направлений изменения фазы на рис. 3, *a* и рис. 3, *b* демонстрирует встречное распространение двух пучков.

Результаты регистрации поля суперпозиции падающего и обращенного пучков приведены на рис. 4. Амплитуда давления в поперечном сечении (рис. 4, *a*) демонстрирует наличие двух неподвижных пучностей, а измеренная фаза (рис.4, *b*) подтверждает противоположный знак давления в этих областях. Распределение фазы в продольном сечении показано на рис.4, *c*. Особенностью всех представленных на рис. 4 распределений фазы является отсутствие монотонных переходов в пределах от минимума до максимума, присущих бегущей волне. Фаза сравнительно однородна, а ее изменения скачкообразные и близки к $\pm 2\pi$. Проявление этих характерных свойств в продольном и поперечном сечениях подтверждает, что интерференция двух пучков действительно образовала стоячую волну. Сохраняющаяся при этом антисимметрия относительно оси показывает, что полученная стоячая волна имеет спиральную структуру.

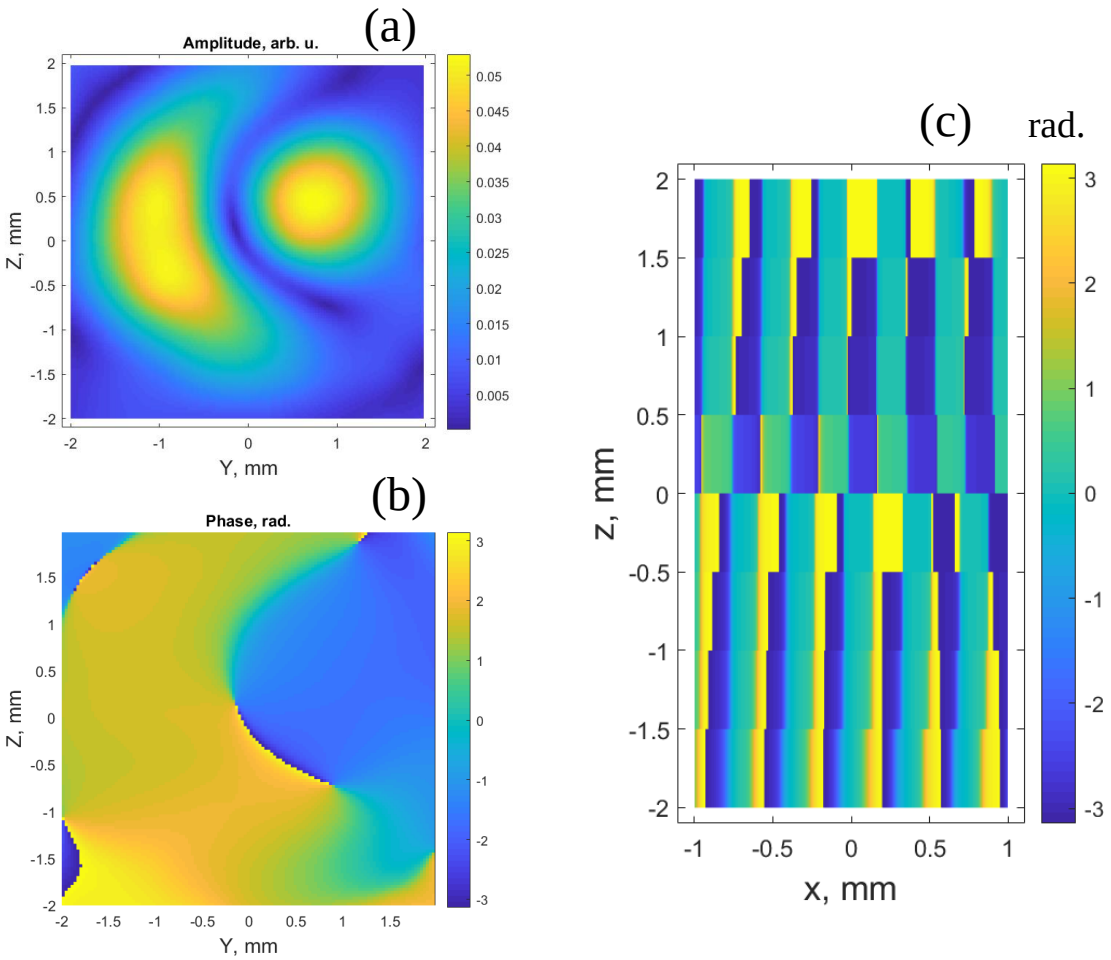


Рис. 4. Распределение поля давления при суперпозиции падающего и обращенного вихрей. a, b – амплитуда и фаза соответственно в поперечном сечении в фокусе, c - фаза в продольном сечении (y=0) вблизи фокуса.

Заключение

В работе продемонстрировано обращение волнового фронта вихревого ультразвукового пучка. Для сферически сфокусированного вихря получен встречный пучок с сохранением направления вращения относительно продольного волнового вектора и воспроизводящий в фокальной области распределение падающего поля. При интерференции полученных в таких условиях встречных вихрей зарегистрирована стоячая волна в виде спирали-геликоиды.

Список литературы

1. Baresch D., Thomas J. L., Marchiano R. Observation of a single-beam gradient force acoustical trap for elastic particles: acoustical tweezers. // Phys. Rev. Lett. 2016. **116**, N 2. P. 024301.

2. Gong Zh., Baudoin M. Three-dimensional trapping and assembly of small particles with synchronized spherical acoustical vortices. // Phys. Rev. Appl. 2020. **14,** N 6 P.064002.

3. *Ghanem M. A., Maxwell A. D., Wang Y. N., Cunitz B. W., Khokhlova V. A., Sapozhnikov O. A., Bailey M. R.* Noninvasive acoustic manipulation of objects in a living body. // Proc. Nat. Acad. of Sci. 2020. **117**, N 29. P. 16848.

4. *Baresch D., Thomas J. L., Marchiano R.* Three-dimensional acoustic radiation force on an arbitrarily located elastic sphere. // J. Acoust. Soc. Am. 2013. **133**, N 1. P.25.

5. *Baudoin M., Gerbedoen J. C., Riaud A., Matar O. B., Smagin N., Thomas J.L.* Folding a focalized acoustical vortex on a flat holographic transducer: Miniaturized selective acoustical tweezers. // Sci. Adv. 2019, ***5***, N4. P.eaav1967.

6. *Терзи М. Е., Цысарь С. А., Юлдашев П. В., Карзова М. М., Сапожников О. А.* Получение закрученного ультразвукового пучка с помощью фазовой пластины с угловой зависимостью толщины. // Вестник МГУ. Физ. Астр. 2017. **1.** Р. 58.

7. *Guo S., Ya Z., Wu P., Wan M.* A review on acoustic vortices: Generation, characterization, applications and perspectives. // J. Appl. Phys. 2022. **132,** N 21, P. 210701.

8. *Brysev A. P., Krutyanskii L. M., Preobrazhenskii V. L.* Wave phase conjugation of ultrasonic beams. // Phys.-Usp. 1998. **41** ,N8, P.793.

9. *Pylnov Yu. V., Krutyansky L. M., Preobrazhensky V. L., Pernod Ph.* Ultrasound WPC Tomography of a Nonlinear Parameter. // Phys. Wave Phenom. 2022. **30**, N4. P. 270.

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39474

Измерение акустического поперечного сечения с использованием оптической теоремы для резонатора Гельмгольца

Климов Д.А.[1)], Уткин Ю.С. [1)], Ермаков С.С. [1)], Кузьмин М.В.[1)], Игошин В.Д.[1)], Петров М.И.[1)]

[1)]Физический факультет, Университет ИТМО, Санкт-Петербург.

Тел.: +7(911)718-93-23; E-mail: daniil.klimov@metalab.ifmo.ru

В данной работе предложен метод измерения акустического поперечного сечения (поперечное сечение эксинкции) для резонаторов Гельмгольца с использованием оптической теоремы. Рассмотрены экспериментальные ограничения, такие как влияние конечного размера источника звука и влияние стоячих волн в безэховой камере, которые осложняют точные измерения. Для решения этих проблем была разработана двухступенчатая методология, включающая реконструкцию фона и компенсацию паразитных рассеяний. Применяя предложенную методику, мы измерили поперечное сечение для резонатора Гельмгольца с высокой точностью, используя акустическую установку с конечным источником волны. Результаты показали, что методика, основанная на оптической теореме и численных моделях, обеспечивает надежный способ исследования акустических резонаторов, открывая новые возможности для анализа акустических метаматериалов и рассеяния звука.

Ключевые слова: оптическая теорема, поперечное сечение эксинкции, акустическое рассеяние, резонаторы Гельмгольца, стоячие волны

УДК: 534.21 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39475

Исследование влияния упругих мод на мультипольный отклик лабиринтного акустического метаатома

Ю.А. Тиманкова[1,a], М.В. Смагин[1,b], М.В. Кузьмин[1,c], Ю. Ли[1,2,d], М.И. Петров[1,e]

[1] *Университет ИТМО. 197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, д.49, литер А.*

[2] *Университет Тунцзи. 200092, г. Шанхай, Китай.*

E-mail: [a]iuliia.timankova@metalab.ifmo.ru, [b]mikhail.smagin@metalab.ifmo.ru, [c]mikhail.kuzmin@metalab.ifmo.ru, [d]yongli@tongji.edu.cn, [e]m.petrov@metalab.ifmo.ru

Аннотация: Акустические метаматериалы в последнее время широко исследуются и постепенно становятся незаменимыми в областях, связанных с манипулированием волновым фронтом звуковых волн или созданием звукопоглощающих конструкций, благодаря своим свойствам, уникальным по сравнению с традиционными материалами. Эти материалы также используются для создания направленных акустических антенн и рассеивателей. Примером может служить лабиринтный акустический метаатом, поддерживающий резонансы Ми и демонстрирующий кардиоидную диаграмму рассеяния на частоте, соответствующей условию синфазного сложения монопольной и дипольной мод (акустический эффект Керкера). Однако вследствие того, что на практике рассеиватель печатается из пластика с помощью аддитивных технологий, оказалось невозможным не учитывать возбуждающиеся в структуре упругие моды. Было проведено численное и экспериментальное исследование взаимодействия акустических и механических мод и влияния последних на диаграмму рассеяния лабиринтного акустического метаатома и его мультипольный состав.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 25-79-31027.

Ключевые слова: рассеяние, лабиринтный акустический метаатом, Ми-резонансы, упругие моды.

Investigation of the Influence of Elastic Modes on the Multipolar Response of a Labyrinthine Acoustic Meta-Atom

I.A. Timankova[1,a], M.V. Smagin[1,b], M.V. Kuzmin[1,c], Y. Li[1,2,d], M.I. Petrov[1,e]

[1] *School of Physics and Engineering, ITMO University, St. Petersburg, 197101, Russia.*

[2] *Institute of Acoustics, School of Physics Science and Engineering, Tongji University, Shanghai, 200092, China*

E-mail: [a]*iuliia.timankova@metalab.ifmo.ru*, [b]*mikhail.smagin@metalab.ifmo.ru*, [c]*mikhail.kuzmin@metalab.ifmo.ru*, [d]*yongli@tongji.edu.cn*, [e]*m.petrov@metalab.ifmo.ru*

Abstract: Acoustic metamaterials have recently been extensively studied and are gradually becoming essential in applications involving manipulation of the acoustic wavefront or the design of sound-absorbing structures due to their properties that are unique compared to conventional materials. These materials are also used in the development of directive acoustic antennas and scatterers. An example is a labyrinthine acoustic meta-atom supporting Mie resonances and exhibiting a cardioid scattering pattern at the frequency corresponding to the condition of in-phase superposition of monopole and dipole modes (the acoustic Kerker effect). However, since in practice the scatterer is fabricated from plastic using additive manufacturing technologies, it became necessary to take into account elastic modes excited in the structure. A numerical and experimental study of the interaction between acoustic and mechanical modes was carried out, as well as an investigation of the influence of the latter on the scattering pattern of the labyrinthine acoustic meta-atom and its multipolar composition.

The work is funded by Russian Science Foundation grant № 25-79-31027.

Keywords: scattering, labyrinthine acoustic meta-atom, Mie resonances, elastic modes.

PACS: 43.20.Fn

УДК: 534.221 + 534.873 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39476

Распространение короткого акустического импульса в среде с обобщенной резонансной релаксацией. Точное аналитическое решение

А.Г. Максимов[1], Г.А. Максимов[2]

[1]*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва*

[2]*Акустический институт им. академика Н.Н. Андреева, г. Москва*

E-mail: gamaximov@mail.ru

Аннотация: В докладе представлено новое точное фундаментальное решение для короткого акустического импульса, распространяющегося в определенном подклассе сред с обобщенной резонансной релаксацией, полученное без требования малости дисперсии фазовой скорости.

Ключевые слова: распространение акустических импульсов, дисперсия, релаксация, акустодиагностика

THE SHORT ACOUSTIC PULSE PROPAGATION IN MEDIUM WITH GENERALIZED RESONANCE RELAXATION. EXACT ANALYTICAL SOLUTION

A.G Maximov[1], G.A. Maximov[2]

[1] *National research nuclear university «MEPhI», Moscow*

[2] *N.N. Andreev's Acoustical Institute, Moscow*

E-mail: gamaximov@mail.ru

Abstract: The new exact fundamental solution is represented in the report for the short acoustic pulse propagating in certain subclass of media with generalized resonance relaxation, which is derived without of requirement of small phase velocity dispersion.

Kaywords: acoustical pulse propagation, dispersion, dissipation, relaxation, acoustic diagnostics

1 Введение

Закономерности распространение акустических импульсов в реальных средах с учетом их поглощения и дисперсии представляют интерес как в задачах передачи информации, например, по гидроакустическому каналу связи, так и в задачах импульсной акустодиагности сред [1]. Если начальная длительность импульса существенно меньше времени характерных релаксационных процессов в среде, то динамика изменения его профиля определяется только

свойствами среды. По особенностям поведения переднего фронта импульса и его тела можно восстанавливать параметры спектра времен релаксации [1,2]. При этом полученные результаты опираются на точные решения, которые найдены лишь для небольшого набора модельных сред с релаксацией [1-3]. В рамках обобщенных моделей сред с резонансной релаксацией [4] аналитические решения ранее были получены только в приближении малой дисперсии фазовой скорости [5]. Убедительное экспериментальное подтверждение особенностей динамики короткого наносекундного акустического импульса в резонансной пузырьковой среде приведено в работе [6]. Следует отметить, что в отличие от чисто релаксационных сред, для которых характерна монотонно возрастающая зависимость от частоты коэффициента поглощения и фазовой скорости и, соответственно, дисперсия этих величин определяется разницей их значений на низких и высоких частотах, в случае обобщенных моделей сред с резонансной релаксацией это уже не так. Поэтому условие применимости разложения по малому параметру, связанному с дисперсией фазовой скорости, которое использовалось при анализе в [5] оказывается ограниченным, особенно в окрестности сильного резонанса, когда точные и приближенные зависимости волнового числа от частоты могут существенно отличаться. В этом случае точные аналитические решения позволяют лучше выявить тонкие детали динамики профиля распространяющегося импульса. Данная работа посвящена поиску таких решений в рамках обобщенных моделей сред с резонансной релаксацией.

2 Распространение коротких акустических импульсов

Распространение плоского акустического импульса в среде с обобщенной резонансной релаксацией в области $x > 0$ с заданным источником на границе $Q(t)$ может быть записано в виде его свертки с функцией Грина (фундаментальным решением)

$$u(x,t) = \int_0^t dt' Q(t') I(t-t', x) \tag{1}$$

Если длительность начального импульса, определяемого функцией $Q(t)$, является достаточно малой по сравнению с длительностью фундаментального решения $I(t,x)$, то (1) можно записать в виде

$$u(x,t) = I(t,x) \int_0^\infty dt' Q(t') \tag{2}$$

Таким образом, основным вопросом при исследовании распространения коротких акустических импульсов в релаксационных средах является поведение фундаментального решения $I(t,x)$.

Фундаментальное решение для плоской волны, распространяющейся вправо, дается интегралом Меллина

$$I(t,x) = \frac{1}{2\pi i}\int_{\gamma} dp e^{pt - xK(p)} \quad , \qquad \gamma = (-i\infty, +i\infty) \tag{3}$$

где волновое число $K(p)$ для модели среды с одной обобщенной резонансной релаксацией может быть записано в виде [4]

$$K(p) = \frac{p}{c_\infty}\left(1 + \Delta\varrho(\Omega\tau,\varphi)\frac{(p\tau+1)cos\varphi+(\Omega\tau)sin\varphi}{(p\tau+1)^2+(\Omega\tau)^2}\right)^{1/2} \tag{4}$$

где, в свою очередь, через τ , Ω и φ обозначены основные параметры модели, соответственно, время релаксации, резонансная частота и угол инерционности. Через Δ обозначен дисперсионный скачек фазовой скорости $\Delta = (c_\infty^2 - c_0^2)/c_\infty^2$ между значениями фазовой скорости на предельно низких c_0 и предельно высоких c_∞ частотах $c_\infty > c_0$, а для ρ имеется выражение $\rho(\Omega\tau,\varphi) = (1+(\Omega\tau)^2)/(\cos(\varphi)+(\Omega\tau)\sin(\varphi))$.

3 Фундаментальное решение

В общем случае найти точное аналитическое представление для интеграла (3) с волновым числом (4) не представляется возможным. В случае малой дисперсии фазовой скорости, когда второе слагаемое под корнем в (4) мало по сравнению с единицей, по этому параметру можно разложить, избавившись, таким образом, от корневой зависимости, и далее можно получить разные аналитические представления фундаментального решения в зависимости от параметров модели, как это было представлено в [5].

Если же дисперсия фазовой скорости не мала, то соответствующее разложение также не будет являться корректным. В этом случае в качестве основной идеи для получения точного аналитического представления для интеграла (3) с волновым числом (4) может быть поиск подкласса сред с обобщенной резонансной релаксацией за счет выбора определенных соотношений между параметрами τ , Ω и φ , при котором волновое число $K(p)$ может быть представлено в виде сложной функции $K(p) = f(g(p))$. Тогда, воспользовавшись теоремой об обобщенной свертке [7], интеграл (4) может быть представлен в виде

$$I(x,t) = \int_0^\infty d\zeta F(\zeta,x)\, G(\zeta,t) \tag{5}$$

где функции $F(\zeta,x)$и $G(\zeta,t)$ определяются следующими интегральными представлениями в виде обратных преобразований Лапласа

$$F(\zeta,x) = \frac{1}{2\pi i}\int_\gamma dp exp(p\zeta - xf(p)) \qquad G(\zeta,t) = \frac{1}{2\pi i}\int_\gamma dp exp(pt - \zeta g(p)) \tag{6}$$

Можно показать, что при выполнении двух условий

$$\Delta\varrho(\Omega\tau,\varphi)=\frac{2}{\tau cos\varphi}\qquad tg\varphi=\frac{1-(\Omega\tau)^2}{2(\Omega\tau)} \tag{7}$$

волновое число (4) может быть представлено виде

$$K(p)=\frac{1}{c_\infty}\left(\sqrt{(p+\frac{1}{\tau})^2+\Omega^2}-\frac{\Omega^2+1/\tau^2}{\sqrt{(p+\frac{1}{\tau})^{2^2}+\Omega^2}}\right) \tag{8}$$

с выбором соответствующих функций

$$f(p)=\frac{1}{c_\infty}\left(p-\frac{\Omega^2+1/\tau^2}{p}\right)\qquad\qquad g(p)=\sqrt{(p+\frac{1}{\tau})^2+\Omega^2}$$

Тогда для интегралов (6) могут быть получены следующие представления

$$F(\zeta,x)=\frac{\partial}{\partial(\zeta-x/c_\infty)}\left[I_0\left(2\sqrt{(\zeta-\frac{x}{c_\infty})\frac{x}{c_\infty}(\Omega^2+1/\tau^2)}\right)\theta(\zeta-x/c_\infty)\right] \tag{9}$$

$$Q(\zeta,t)=\frac{\partial}{\partial\zeta}\left[J_0\left(\Omega\sqrt{t^2-\zeta^2}\right)\theta(t-\zeta)\right] \tag{10}$$

где через $J_0(z)$ и $I_0(z)$ обозначены функции Бесселя действительного и мнимого аргументов, а через $\theta(z)$ – единичная функция Хевисайда.

Условия (7) ограничивают область допустимых параметров сред с резонансной релаксацией, для которых удается получить точные аналитические решения. Частными случаями таких сред является чисто релаксационная среда при $\Omega=0$, а также специальный случай $\Omega\tau=1, \varphi=0$, для которого коэффициент затухания на низких частотах оказывается не квадратичным по частоте, а пропорциональным ее четвертой степени. Характерные зависимости фазовой скорости и коэффициента затухания, удовлетворяющие условиям (7), приведены на рис. 1.

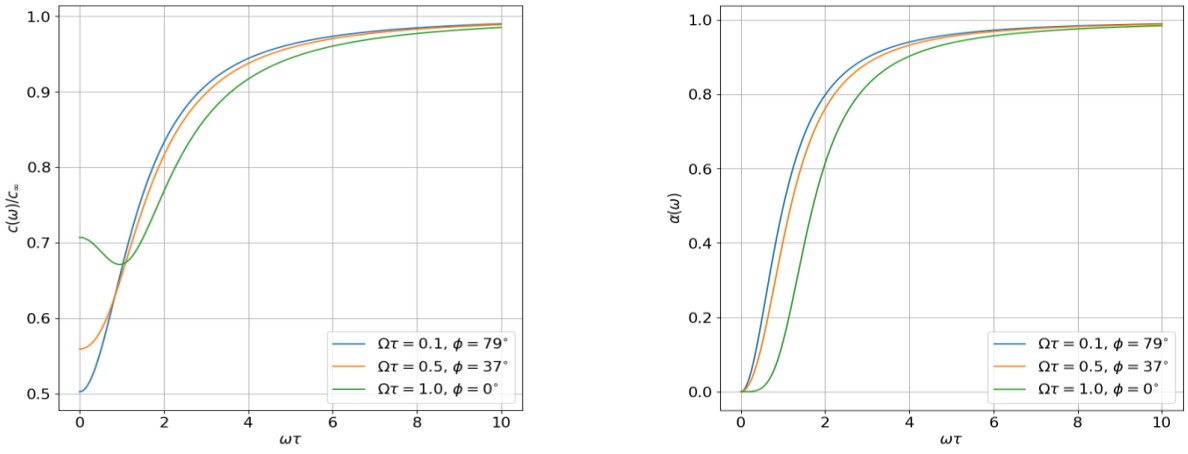


Рис.1 – Частотная зависимость фазовой скорости (слева) и коэффициента затухания (справа) при различных допустимых значениях параметров Ωτ и φ в (7)

Подставляя (12) и (13) в (5), можно после ряда преобразований получить финальное аналитическое представление для фундаментального решения в виде

$$I(x,t) = e^{-t/\tau}\left[\delta(t - x/c_\infty) + \frac{x}{c_\infty \tau^2}(1+(\Omega\tau)^2) J_0\left(\Omega\sqrt{t^2 - \left(\frac{x}{c_\infty}\right)^2}\right)\theta\left(t - \frac{x}{c_\infty}\right) - \right.$$
$$- \frac{\Omega\frac{x}{c_\infty}}{\sqrt{t^2 - \left(\frac{x}{c_\infty}\right)^2}} J_1\left(\Omega\sqrt{t^2 - \left(\frac{x}{c_\infty}\right)^2}\right)\theta\left(t - \frac{x}{c_\infty}\right) + \quad (11)$$
$$\left. + \int_0^{t - x/c_\infty} d\zeta \frac{\frac{x}{c_\infty \tau}(1+(\Omega\tau)^2)}{\zeta\tau} I_2\left(2\sqrt{\frac{\zeta}{\tau}\frac{x}{c_\infty\tau}(1+(\Omega\tau)^2)}\right) J_0\left(\Omega\sqrt{t^2 - \left(\zeta + \frac{x}{c_\infty}\right)^2}\right)\theta\left(t - \frac{x}{c_\infty}\right)\right]$$

Первое слагаемое в (11) соответствует упругому предвестнику, два следующих слагаемых описывают переходные процессы в прифронтовой области, а последнее интегральное слагаемое описывает основное тело импульса, вклад которого является доминирующим на больших расстояниях.

На рис.2 показана динамика распространения импульса при $\Omega\tau = 1$ в нормированном на его амплитуду масштабе на различных безразмерных расстояниях, рассчитанная с помощью аналитического представления (11) (красная штриховая линия) и путем прямого расчета интеграла (3) с помощью преобразования Фурье (черная сплошная линия) для начального гауссова импульса *T*, длительность которого в 10 раз меньше времени релаксации τ. Зелеными точками на этом рисунке показан вклад трех неинтегральных слагаемых в (11). Видно, что во-первых, аналитическое представление (11) полностью совпадает с прямым численным расчетом, во-вторых, вклад неинтегральных слагаемых в (11) перестает быть значимым на безразмерных расстояниях больших 5, а у тела импульса формируется характерная отрицательная фаза, обусловленная наличием характерного минимума фазовой скорости при $\Omega\tau = 1$, $\varphi = 0$ (см. рис. 1).

4 Заключение

В докладе в рамках описания сред с обобщенной резонансной релаксацией, найден подкласс моделей, допускающих точное аналитическое представление для короткого акустического импульса, распространяющегося в такой среде. Полученное новое представление не ограничено условием малости дисперсии фазовой скорости. Оно позволяет проводить анализ особенностей динамики импульса в зависимости от параметров модели и может служить основой для расширения области применимости метода импульсной акустодиагностики релаксирующих сред.

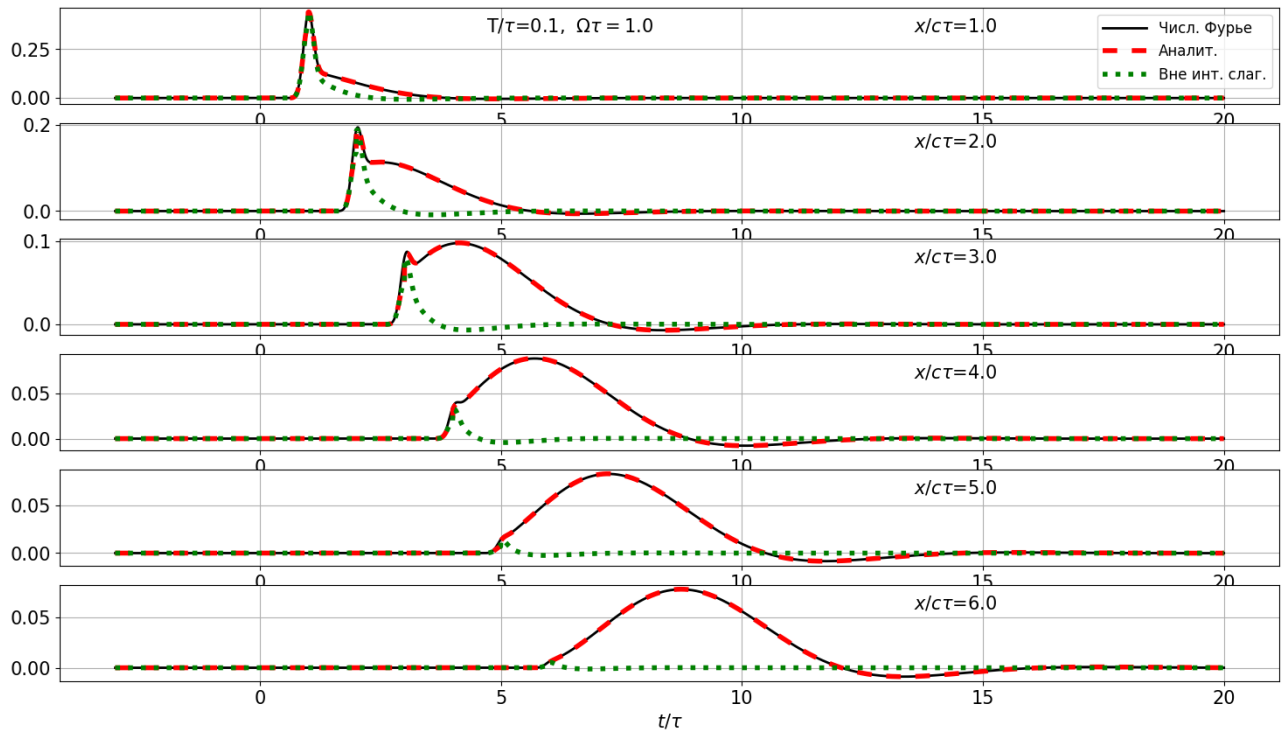


Рис.2 - Сравнение динамики профиля акустического импульса на различных пройденных расстояниях

Список литературы

1. *Максимов Г.А.* О возможностях импульсной акустодиагностики однородных релаксационных сред. // Акуст. журн. 1996, **42**, №4, С. 541-550
2. *Максимов Г.А., Ларичев В.А.* К аналитическому описанию динамики короткого импульса, распространяющегося в релаксационной среде. // Акуст. журн. 1997, **43**, №3, С. 367-375.
3. *Ларичев В.А. , Максимов Г.А.* Распространение акустического импульса в среде с двумя релаксационными процессами. Анализ точного решения. // Акуст. журн. 1999, **45**, №6, С. 844-856.
4. *Ларичев В.А., Максимов Г.А.* О едином описании релаксационных и резонансных свойств акустических сред в рамках термодинамического подхода // Акуст. журн. 1998, **44**, №6, С. 814-822.
5. *Максимов Г.А., Ларичев В.А.* Распространение короткого импульса в среде с резонансной релаксацией. Точное решение. // Акуст. журн. 2003, **49**, №5, С. 656-666.
6. *Карабутов А.А., Ларичев В.А., Максимов Г.А., Пеливанов И.М., Подымова Н.Б.* Динамика релаксации широкополосного наносекундного акустического импульса в пузырьковой среде. // Акуст. журн. 2006, **52**, №5, С. 676–682.
7. *Лаврентьев М.А., Шабат Б.В.* Методы теории функций комплексного переменного. М.: Наука, 1987.

УДК: 534.231.2 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39477

Численное моделирование кромочного шума с применением метода на основе синтетической турбулентности

А.С. Суворов[1], Н.В. Балакирева[1,a], С.А. Смирнов[1], О.Ф. Севрюков[1]

[1] Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук, 603951, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

E-mail: [a]balakireva@ipfran.ru

Аннотация: В работе приводится оценка точности метода расчета кромочного шума, основанного на концепции синтетической турбулентности, на модельной задаче обтекания задней кромки квазидвумерного профиля потоком воды. Метод оперирует данными об осредненных характеристиках течения и коэффициентом передачи «источник объемного ускорения - давление». При использовании подобранных модельных зависимостей радиусов корреляции средняя погрешность метода составляет 2 дБ в сравнении с прямым методом «гидродинамика–акустика».

Ключевые слова: кромочный шум, синтетическая турбулентность

Numerical modeling of edge noise using a synthetic turbulence-based method

A.S. Suvorov[1], N.V. Balakireva[1,a], S.A. Smirnov[1], O.F. Sevryukov[1]

Federal Research Center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, 46 Ulyanov Str., Nizhny Novgorod 603951, Russia

E-mail: [a]balakireva@ipfran.ru

Abstract: This paper evaluates the accuracy of a method for calculating edge noise based on the concept of synthetic turbulence, using a model problem of water flow past the trailing edge of a quasi-two-dimensional airfoil. The method utilizes data on averaged flow characteristics and the "volume acceleration source - pressure" transfer coefficient. Using selected model correlation radii, the average error of the method is 2 dB compared to the direct hydrodynamics-acoustics method.

Keywords: trailing-edge noise, synthetic turbulence

PACS: 43.28.Ra, 43.30.Nd, 47.27.nb

Введение

Прогнозирование широкополосного кромочного шума, возникающего при взаимодействии турбулентного пограничного слоя с задними кромками обтекаемых тел, является актуальной задачей при проектировании морской техники [1]. Существенную роль при этом играют вибро-акустические характеристики упругих несущих поверхностей, обусловливающие резонансное усиление звукового излучения.

Классический подход к расчету кромочного шума основан на аналогии Лайтхилла [2-4]. Несмотря на высокую точность, данный подход предъявляет чрезмерные требования к вычислительным ресурсам для реальных инженерных конструкций. Аналогия Фокса Уильямса–Хокингса [5], широко применяемая в аэроакустике, не учитывает упругость обтекаемой конструкции и потому ограниченно применима к гидродинамическим задачам при малых числах Маха.

Альтернативой служат методы на основе синтетической турбулентности, где поле пульсаций скорости генерируется исходя из статистических характеристик турбулентности. В работе [6] предложен и верифицирован вычислительно эффективный метод такого рода, ориентированный специально на гидроакустические задачи: метод реализован в частотной области с явным учетом упругости обтекаемого тела, что принципиально отличает его от известных аэроакустических аналогов RPM/FRPM [7-8]. В настоящей работе проводится проверка метода на модельной задаче обтекании задней кромки квазидвумерного упругого профиля потоком воды в сравнении с прямым методом «гидродинамика-акустика» [3-4].

1 Постановка задачи

Рассматривается задача расчета шума задней кромки квазидвумерного плосковыпуклого профиля, обтекаемого потоком воды. Скорость невозмущенного потока U_∞=4.5 м/с, скорость звука с=1500 м/с, кинематическая вязкость жидкости ν=1.006×10^{-6} м^2/с. Геометрические параметры профиля: хорда b=200 мм, размах h=200 мм. Число Маха набегающего потока $M=U_\infty/c\approx0.003$ соответствует режиму несжимаемого течения и позволяет перейти к решению в частотной области. Материал профиля: плотность ρ=2800 кг/м^3, модуль Юнга E=7.2×10^{10} Па, коэффициент Пуассона ν_e=0.33.

2 Гидродинамическая часть задачи

Расчетная область гидродинамической задачи для получения осредненных полей представляет собой параллелепипед с профилем внутри (рис. 1,а). Расстояние до входной границы - 4b, до выходной - 8b, по нормали к профилю в обе стороны - 4b. На входной границе *1* задается скорость набегающего потока U_∞; на выходной границе *2* — нулевое среднее избыточное давление; на боковых гранях *3* — условие непротекания; на поверхности профиля *4* — условия прилипания и непротекания. Блочно-структурированная сеточная модель (рис.

1,б) содержит 15 тыс. гексаэдрических ячеек, размер первой пристеночной ячейки составляет 1.5×10^{-4} м, что соответствует $y^{+}=10\div20$. Движение жидкости описывается системой уравнений Навье–Стокса, осредненных по Рейнольдсу (RANS), с замыканием моделью турбулентности SST Ментера [9]. Осредненные по результатам RANS моделирования поля модуля скорости U, кинетической энергии турбулентности E и модуля завихренности Ω используются далее как входные данные для метода синтетической турбулентности (рис. 2).

Для прямого метода «гидродинамика–акустика» вихреразрешающее моделирование проводится только для компактной области вблизи задней кромки профиля. Подробное описание гидродинамической модели и результатов моделирования можно найти в [10].

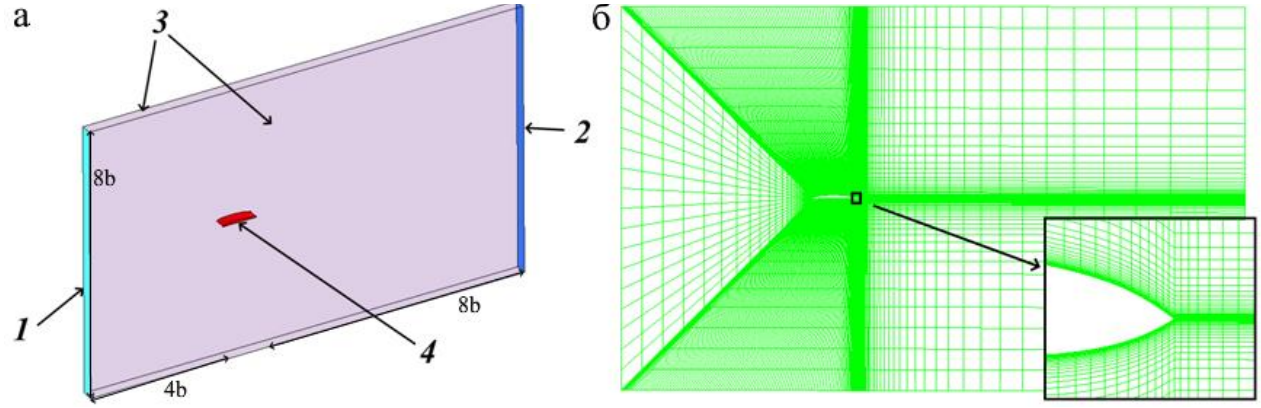


Рис. 1 — Расчетная область и граничные условия гидродинамической задачи (а), сеточная модель (б)

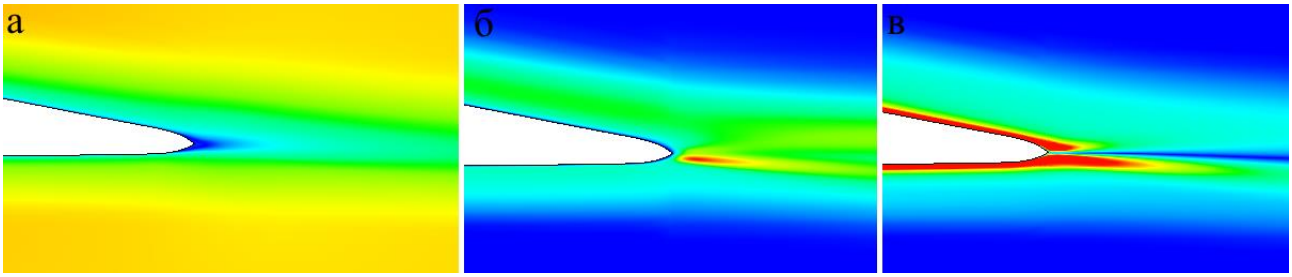


Рис. 2 — Осредненные поля модуля скорости (а), кинетической энергии турбулентности (б) и модуля завихренности (в)

3 Акустическая часть задачи

Коэффициент передачи (КП) - «источник объемного ускорения – давление» - представляет собой функцию Грина, учитывающую упругость профиля и определяется методом взаимности: источник объемного ускорения единичной амплитуды помещается в контрольную точку дальней зоны, решается обратная задача и находится распределение КП по расчетной области. Расчет КП проводится методом конечных элементов в рамках связанной постановки «жидкость–упругое тело» в ПО «CATEC 3». Акустическая конечно-элементная модель подробно описана в [10]. Данная КЭМ используется при прогнозировании шумоизлучениями обоими метолами, что обеспечивает корректность сравнения. Контрольная точка для определения акустического давления находится на расстоянии 50 м над задней кромкой профиля. Дипольный характер КП (рис. 3) подтверждает, что основное излучение происходит именно от задней кромки профиля.

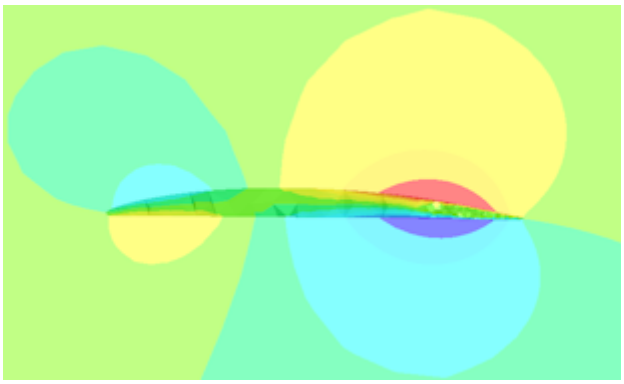


Рис. 3 — Реальная часть КП K в диаметральном сечении на некоторой частоте

4 Результаты и обсуждения

Метод синтетической турбулентности, описанный в [6], применяется к рассматриваемой геометрии. Пульсации нормальной компоненты скорости моделируются пространственной фильтрацией поля белого шума Гауссовым фильтром с радиусами корреляции r_x (вдоль размаха профиля) и r_y (по нормали к поверхности профиля). Спектральная плотность мощности пульсаций описывается спектром фон Кармана. Для данной задачи проведено специальное исследование зависимостей радиусов корреляции нормальной компоненты скорости по данным из вихреразрешающего моделирования, по результатам которого получены уточненные линейные аппроксимации (рис. 4):

$$r_x=0.055\delta+0.113y,$$

$$ry=0.085\delta+0.16y,$$

где δ=3 мм — толщина пограничного слоя, y — расстояние по нормали до поверхности.

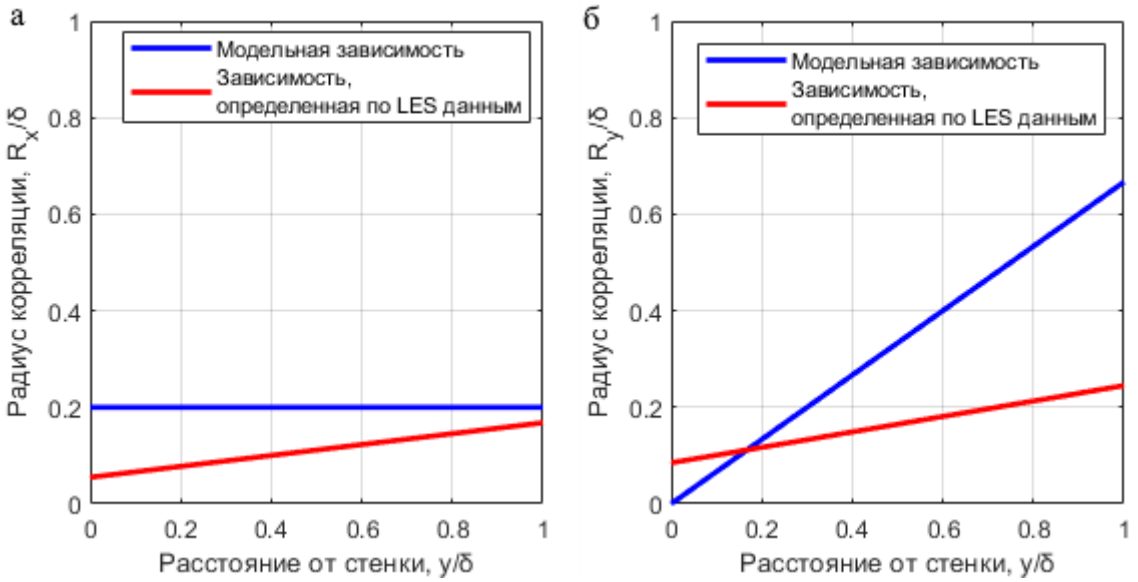


Рис. 4 – Введенные зависимости радиусов корреляции нормальной компоненты скорости вдоль размаха профиля от расстояния до поверхности профиля (а), вдоль нормали к поверхности лопасти от расстояния до поверхности профиля (б)

Мощность звукового давления в контрольной точке вычисляется по формуле, интегрирующей вклады элементарных струек тока с учетом пространственного Фурье-образа

производной КП вдоль линии тока [6]. Дискретизация линий тока выполняется исходя из проведенного в [6] исследования сходимости метода.

Сравнение спектров акустического давления в контрольной точке, полученных прямым методом «гидродинамика–акустика» и методом синтетической турбулентности, представлено на рис. 5. При использовании уточненных зависимостей для радиусов корреляции наблюдается качественное совпадение формы спектральных кривых, включая положение и уровень основных максимумов. Средняя погрешность метода синтетической турбулентности составляет 2 дБ. Данный результат подтверждает, что точность метода существенно определяется выбором модельных зависимостей радиусов корреляции: применение обобщенных зависимостей без адаптации к конкретной геометрии дает погрешность порядка 5 дБ, тогда как подбор зависимостей по нестационарным данным вихреразрешающего расчета позволяет снизить погрешность до 2 дБ.

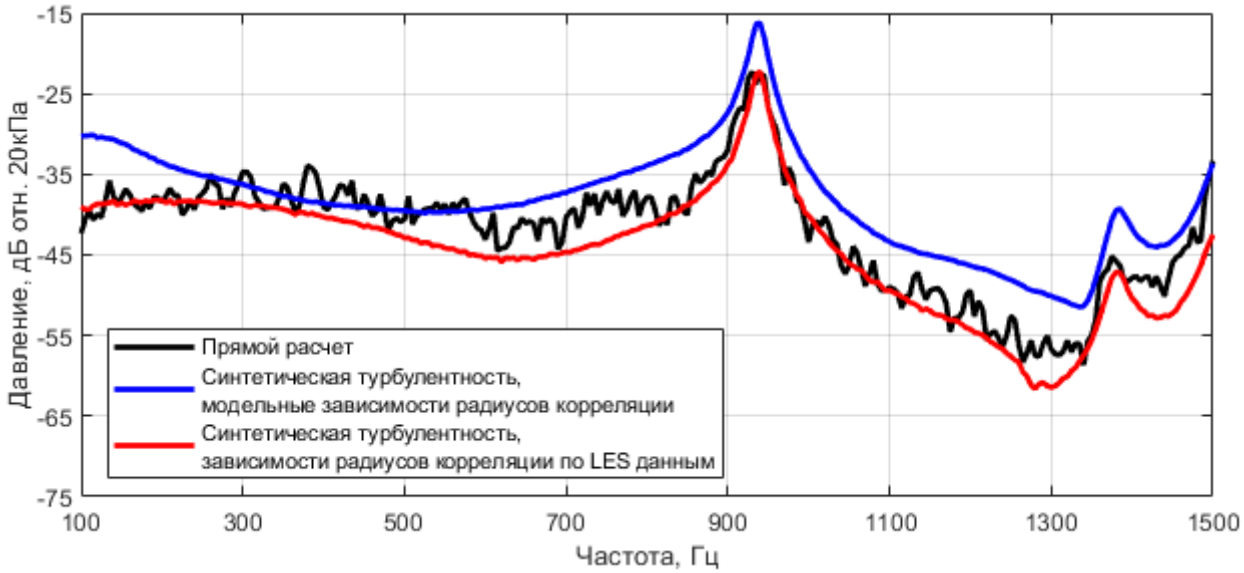


Рис. 5 — Сравнение результатов расчета прямым методом и методом синтетической турбулентности

Заключение

В работе проведена оценка точности метода расчета кромочного шума на основе синтетической турбулентности применительно к задаче обтекания задней кромки квазидвумерного упругого профиля потоком воды. Сравнение с эталонным расчетом показало среднюю погрешность не более 2 дБ при качественном совпадении спектральных характеристик в широком частотном диапазоне. Полученные результаты подтверждают применимость метода для экспресс-оценки кромочного шума упругих тел в гидроакустических приложениях. Однако требуется дальнейшее исследование модельных зависимостей радиусов корреляции для корректной работы метода. При этом нужно отметить, что скорость вычислений сокращается на порядки и на первый план выходит решение акустической задачи, а не гидродинамической.

Работа выполнена в рамках темы госзадания ИПФ РАН FFUF-2025-0007.

Список литературы

1. *Chevalier F., Bordier L., Leblond C., Sainclair F.* Numerical prediction of the noise radiated from silent non-cavitating marine propellers // OCEANS 2019. PP. 1–4.

2. *Lighthill M.J.* On Sound Generated Aerodynamically. I. General Theory // Proc. R. Soc. Lond. Ser. A. 1952. **211**. P. 564–587.
3. *Суворов А.С., Коротин П.И., Соков Е.М.* Метод конечно-элементного моделирования шумоизлучения, генерируемого неоднородностями тел в турбулентном потоке // Акустический журнал. 2018. **64**, № 6. С. 756–757.
4. *Суворов А.С., Соков Е.М., Вировлянский А.Л., Еремеев В.О., Балакирева Н.В.* Метод конечно-элементного моделирования гидродинамического шума упругих тел // Акустический журнал. 2023. **69**, № 6. С. 713–721.
5. *Ffowcs Williams J.E., Hall L.H.* Aerodynamic sound generation by turbulent flow in the vicinity of a scattering half plane // J. Fluid Mech. 1970. **40**, N 4. P. 657–670.
6. *Балакирева Н.В., Суворов А.С.* Численное моделирование кромочного шума с применением метода на основе синтетической турбулентности // Прикладная математика и механика. 2024. **88**, № 5. С. 758-777.
7. *Ewert R.* RPM – the fast Random Particle-Mesh method to realize unsteady turbulent sound sources for CAA applications // 13th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. 2007.
8. *Ewert R.* Broadband slat noise prediction based on CAA and stochastic sound sources from a RPM method // Comput. Fluids. 2008. **37**. P. 369–387.
9. *Menter F.R.* Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA J. 1994. **32**, N 8. P. 1598–1605.
10. *Балакирева Н.В., Зайцева С.Г.* Применение метода эквивалентных источников для численного моделирования гидродинамического шума упругих тел // Динамика и виброакустика. 2024. **10**, № 3. С. 7–18.
11. *de Karman T.; Howarth L.* On the Statistical Theory of Isotropic Turbulence // Proceedings of the Royal Society of London. Series A - Mathematical and Physical Sciences. 1938. **164** N 917. P. 192–215.

УДК: 534 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39478

Расчетно-экспериментальное исследование влияния гидроупругих процессов на формирование гидродинамического кромочного шума

Суворов А.С.[1], Зайцева С.Г.[1,a], Стуленков А.В.[1], Вьюшкина И.А.[1]

[1] Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук.. Нижний Новгород,603951, Россия;

E-mail:[a] s.zaitseva@ipfran.ru

Аннотация: В работе на основе расчётно-экспериментального подхода исследован гидродинамический кромочный шум упругих тел. Методология включает численное моделирование акустического шумоизлучения от квадрупольных источников (по аналогии Лайтхилла) и физический эксперимент с самодвижущейся масштабной акустической моделью в открытой акватории. В отличие от аэроакустики, упругие свойства тела в воде вносят определяющий вклад в излучение. Генерация шума рассмотрена как рассеяние псевдозвуковых волн упругой поверхностью. Показано, что использование материалов с высоким внутренним демпфированием позволяет эффективно снижать кромочный шум.

Ключевые слова: гидроупругие процессы, кромочный шум, гидроакустика, внутреннее демпфирование, собственные моды, численное моделирование, масштабный эксперимент

Computational and Experimental Study of the Influence of Fluid-Structure Interaction on the Generation of Hydrodynamic Edge Noise

A. S. Suvorov[1], S. G. Zaitseva[1,a], A. V. Stulenkov[1], I. A. V'yushkina[1]

[1]Federal Research Center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences. Nizhniy Novgorod, 603951, Russia.

E-mail:[a] s.zaitseva@ipfran.ru

Abstract: This work presents a computational and experimental study of hydrodynamic edge noise generated by elastic bodies. The methodology includes numerical modeling of acoustic noise radiation from quadrupole sources (following Lighthill's analogy) and physical experiments with a self-propelled scale model in an open water area. Unlike in aeroacoustics, the elastic properties of a body in water make a dominant contribution to the radiated noise. Noise generation is considered as the scattering of pseudo-sound waves by an elastic surface. It is shown that the use of materials with high internal damping can effectively reduce edge noise.

Keywords: fluid-structure interaction, hydrodynamic edge noise, hydroacoustics, internal damping, eigenmodes, numerical simulation, scaled model experiment

PACS: 43.30.Nb, 43.40.Rj, 43.28.Ra

Введение

Проблема снижения гидродинамического кромочного шума, возникающего при обтекании упругих конструкций турбулентным потоком, является одной из ключевых в морском кораблестроении. В гидроакустике, в отличие от аэроакустики, упругие свойства тела и связанные с ними гидроупругие процессы вносят определяющий вклад в формирование акустического поля. Понимание принципиальных различий между акустическим излучением в воде и в воздухе является необходимой теоретической базой для обоснованного подхода к снижению гидродинамического кромочного шума.

С развитием современных технологий появилась возможность численного прогнозирования шумов обтекания. Чаще всего используется аналогия Лайтхилла [1], концепция которой подразумевает разделение задачи на гидродинамическую и акустическую. К настоящему времени разработан ряд эффективных аналитических и численных методов решения уравнения Лайтхилла с известной правой частью, в том числе и в присутствии отражающих границ [2]. Аналогия Фокс Вильямса-Хокингса [3] (FW-H) приобрела большую популярность и широко используется при численном прогнозировании аэроакустических процессов, в том числе шумоизлучения воздушных винтов. Однако аналогия FW-H при прогнозировании гидродинамических процессов не может обеспечить получение корректных уровней шумоизлучения ввиду неучета упругости излучающего тела. В данной работе продемонстрированы принципиальные отличия в расчете шумоизлучения тел в воздухе и в воде, обусловленные проявлением гидроупругости.

1 Экспериментальное исследование кромочного шума на физической масштабной акустической модели

Для исследования влияния гидроупругих процессов на формирование кромочного шума выполнен эксперимент на самодвижущейся физической масштабной акустической модели (см. рис. 1). Испытания проводились на воздухе и в воде. Подводные измерения проводились для работающего движителя без движения (стоповый режим). Для этого аппарат фиксировался на месте тросами, растянутыми между моделью и берегом, а в вертикальной плоскости удерживался на глубине посредством системы грузов и плавучестей,

прикрепленных к аппарату. Акустический сигнал записывался горизонтальной гидроакустической антенной.



Рисунок 1 - Объект исследований: физическая масштабная акустическая модель

Результаты измерений шумоизлучения представлены на рис. 2. Здесь и далее на графиках отложены значения частот, взятые относительно приведенной частоты, рассчитанной по формуле:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{Eh^2}{\rho L^4}}$$

где E – модуль Юнга, h – толщина пластины (лопасти), ρ– плотность материала, L – длина лопасти.

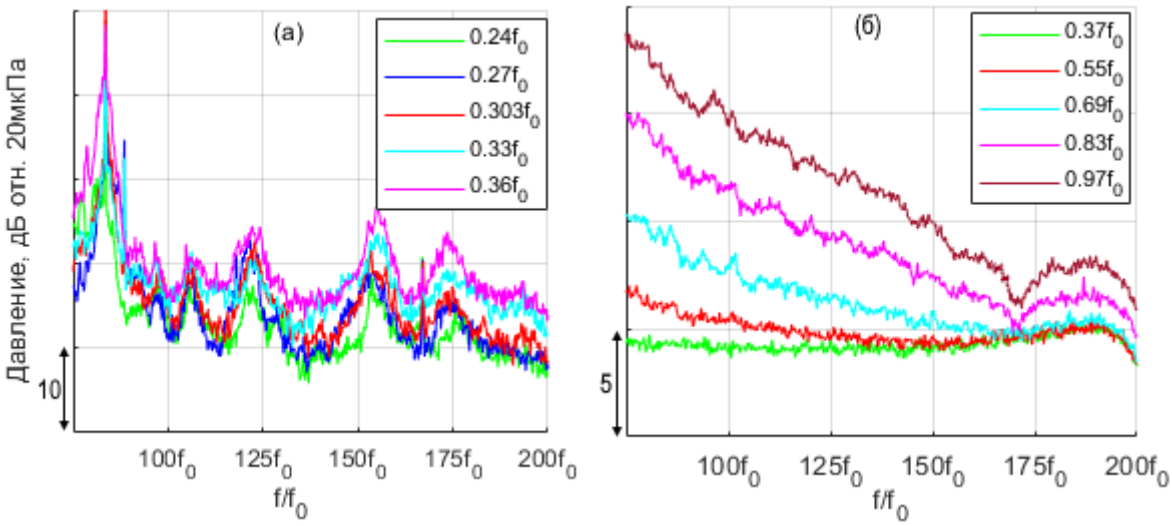


Рисунок 2 - Экспериментальные спектры плотности мощности давления, измеренные в воде (а) и в воздухе (б)

Видно, что спектры, полученные по результатам обработки воздушных испытаний, носят широкополосный характер без выраженных резонансов и характеризуются плавным спадом уровня звукового давления с частотой. При обтекании лопасти потоком воздуха с ее задней кромки срываются вихри. Процесс срыва вихрей случаен по частоте и интенсивности, что создает сплошной спектр шума.

Результаты обработки измерений шума движительного комплекса в водной среде демонстрируют сильно изрезанный характер кривых. Для анализа данного эффекта рассмотрена модельная задача об излучении движителя в воздухе и в воде.

2 Численное исследование вклада упругих резонансов тела в уровень кромочного шума

Для проведения численного эксперимента разработана конечно-элементная модель гребного винта, окружённого акустической средой (рис. 3,а). Размерность модели составляет ~1.5 млн. степеней свободы. Красными цветом отмечены граничные условия, предотвращающие отражение акустических волн обратно в расчётную область.

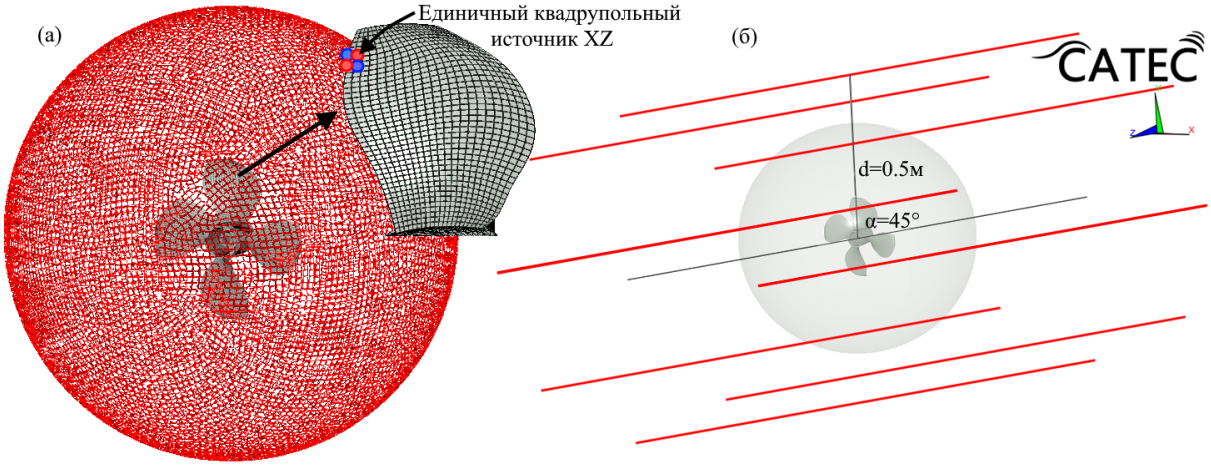


Рисунок 3 – Расчетная схема модельной задачи - (а), схема расчета проходных характеристик - (б)

В качестве источника шума рассматривается единичный квадруполь, расположенный у задней кромки одной из лопастей. Выбор квадрупольного порядка мультипольности обусловлен природой кромочного шума: изолированные вихревые структуры генерируют именно квадрупольное излучение, направленное в плоскости, нормальной к поверхности лопасти.

Для количественной оценки шумоизлучения выбрано усреднённое значение проходных характеристик, расположенных под азимутальным углом $\alpha=45°$ (рис. 3,б). Проходная характеристика соответствует максимальному давлению на каждой частоте для заданного расстояния от объекта.

Исследование влияния упругости тела и свойств среды выполнено для четырёх расчётных схем: упругое тело в воздухе, упругое тело в воде, жёсткое тело в воздухе, жёсткое тело в воде. Жёсткое тело моделируется увеличением модуля упругости на несколько порядков, что исключает появление собственных резонансов гребного винта в исследуемом частотном диапазоне.

На рис. 4 представлены полученные расчетные графики для описанных моделей.

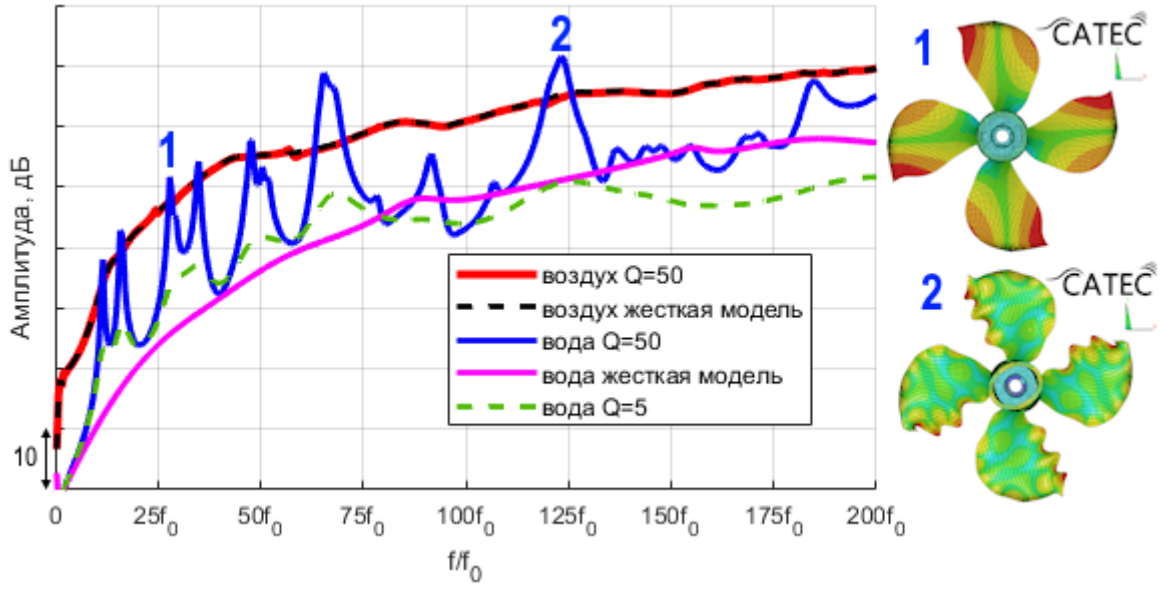


Рисунок 4 – Усредненные значения проходных характеристик для гребного винта в воздухе и в воде и некоторые формы колебаний

По полученным результатам можно заметить, что для вариантов расчета упругого винта, регистрируемое давление (рассматриваемых проходных характеристик) является суперпозицией двух полей: прямого излучения источника (единичного квадруполя) и ответного (переизлученного) поля упругих колебаний гребного винта, возбужденного этим квадруполем. Анализируя кривые, полученные для упругого и жесткого гребных винтов в воздухе (красная и черная кривые рис. 4), видно, что они совпадают. Это говорит о том, что в воздухе, амплитуда вынужденных колебаний лопасти настолько мала (из-за слабой нагрузки), что основной вклад в давление дает не переизлучение лопасти, а рассеяние первичного поля квадруполя на жесткой поверхности лопасти. Это показывает, что в среде с низким импедансом (для воздуха ρc~400) упругость тела фактически не играет роли, то есть в аэроакустике тело может считаться абсолютно жестким.

Анализируя результаты в воде (синяя и розовая кривые рис. 4) видно, что спектр давления для упругого гребного винта имеет сложный характер с ярко выраженными резонансными максимумами, превышающими уровень для жесткого варианта на величину до 25 дБ. Эти максимумы соответствуют собственным частотам упругих колебаний лопастей в воде. Некоторые из форм колебаний, представлены на рис. 4 справа.

Также стоит отметить, что для случая жесткого гребного винта в воде полученная кривая (розовая на рис.4) демонстрирует дипольный характер, причем ее уровень соответствует положениям антирезонансов тела в воде.

3 Анализ влияния добротности материала тела на коэффициент передачи

Полученные результаты демонстрируют, что ключевым параметром, определяющим эффективность мер по снижению шума, является коэффициент передачи, который, в том числе

зависит от механических свойств конструкции. В соответствии с этим проведен анализ влияния добротности материала на уровень рассматриваемой характеристики. Для этого в численную модель гребного винта в воде внесены дополнительные потери, которые обеспечивают добротность рассматриваемой системы в 10 раз меньше изначально рассматриваемой (5 против 50).

На рис. 4 представлены результаты сопоставления проходных характеристик для упругого гребного винта в воде с добротностями 50 и 5 (синяя и зеленая кривые). Для варианта с увеличенным демпфированием наблюдается снижение уровня давления на резонансных максимумах в сравнении с исходной моделью. Данный результат говорит о высоком потенциале использования низкодобротных материалов для снижения шумоизлучения.

Заключение

В работе представлено расчётно-экспериментальное исследование кромочного шума упругого движителя в воде и в воздухе. Эксперимент показал принципиальное различие: в воде спектр шума содержит резонансные пики на собственных частотах тела, тогда как в воздухе спектр широкополосный. Численное моделирование подтвердило, что эти пики обусловлены именно упругостью тела — переход к абсолютно жёсткой модели в воде приводит к широкополосному спектру, тогда как в воздухе упругость не влияет на излучение. Исследованы возможности снижения шума: уменьшение добротности системы (за счёт использования материалов с высоким внутренним демпфированием) существенно подавляет резонансные максимумы, что демонстрирует высокий потенциал такого подхода для практического снижения кромочного шума в гидроакустике.

Работа выполнена в рамках темы госзадания ИПФ РАН FFUF-2025-0007

Список литературы

1. *Lighthill, M.* On Sound Generated Aerodynamically. I. General Theory. Proc. R. Soc. Lond. Ser. A Math. Phys. Sci. 1952, 211, 564–587.

2. *N. Curle*. The influence of solid boundaries upon aerodynamic sound. Proc. R. Soc. Lond. A, 231:505–514, 1955.

3. *J.E. Ffowcs Williams, L.H. Hall*. Aerodynamic sound generation by turbulent flow in the vicinity of a scattering half plane. Journal of fluid mechanics, 40(4):657–670, 1970.

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39479

Анизотропия параметров акустических волн в монокристаллах ферробората гольмия

Турчин П.П.[1)2)], Турчин В.И.[1)], Бурков С.И.[1)], Гудим И.А.[2)], Пляскин М.Е.[1)], Чулкова М.Ю.[1)]

[1)]Сибирский федеральный университет, город Красноярск;

[2)] Институт физики им. Л.В.Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН, город Красноярск;

Тел.: (+7 904 890 50 94); E-mail: (pturchin@sfu-kras.ru)

Эхо-импульсным ультразвуковым методом определены электромеханические постоянные тригонального монокристалла ферробората гольмия. На основе этих постоянных исследована анизотропия скоростей, коэффициентов электромеханической связи и углов отклонения потока энергии акустических волн различных типов в монокристаллах ферробората гольмия, а также дисперсия волн Лэмба и SH-волн в слоистых структурах на их основе.

Ключевые слова: акустические волны, ферроборат гольмия

Anisotropy of acoustic wave parameters in holmium ferroborate single crystals

Turchin P.P.[1)2)], Turchin V.I.[1)], Burkov S.I.[1)], Gudim I.A.[2)], Plyaskin M.E.[1)], Chulkova M.Yu.[1)]

[1)] Siberian Federal University Krasnoyarsk, Russian Federation;

[2)] Kirensky Institute of Physics Federal Research Center KSC SB RAS Krasnoyarsk, Russian Federation

Тел.: (+7 904 890 50 94); E-mail: (pturchin@sfu-kras.ru)

The electromechanical constants of a trigonal holmium ferroborate single crystal were determined using the echo-pulse ultrasound method. These constants were used to study the anisotropy of velocities, electromechanical coupling coefficients, and energy flux deflection angles of acoustic waves of various types in holmium ferroborate single crystals, as well as the dispersion of Lamb and SH waves in layered structures based on them.

Keywords: acoustic waves, holmium ferroborate

УДК: 534.2. DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39481

Возбуждение и распространение поверхностных акустических волн в образцах с кубической анизотропией

Е.В. Глушков [1,a], Н.В. Глушкова [2,b], О.Н. Киселев [3,c]

[1)] Институт математики, механики и информатики Кубанского государственного университета, 350040 Краснодар, ул. Ставропольская, 149

E-mail: [a] evg@math.kubsu.ru, [b] nvg@math.kubsu.ru, [c] kiselevoleg2016@gmail.com

Сравнительно недавно А.Г. Эвери (A.G. Every, JASA, **138**, 2015) показал, что в упругом полупространстве с сильной кубической анизотропией наряду с классической волной Рэлея появляется дополнительная сверхзвуковая поверхностная волна. В настоящей работе на основе полуаналитического интегрального подхода исследуются угловые зависимости каждой из этих двух мод. Показано проявление эффекта множественности волновых фронтов, ассоциированных с одним корнем характеристического уравнения, а также резкий рост амплитуды дополнительной волны в определенных направлениях при значительном замедлении и ослаблении в этом направлении исходной рэлеевской волны.

Ключевые слова: произвольная анизотропия, бегущие волны, матрица Грина, интегральные и асимптотические представления, резонансные направления, каустики.

Excitation and propagation of surface acoustic waves in samples with cubic anisotropy

E.V. Glushkov[1,a], N.V. Glushkova[1,b], O.K. Kiselev[1,c]

[1] Institute for Mathematics, Mechanics and Informatics, Kuban State University. Russia, Krasnodar, Stavropolskaya st., 149

E-mail: [a]evg@math.kubsu.ru, [b]nvg@math.kubsu.ru, [c] kiselevoleg2016@gmail.com

Relatively recently, A.G. Every (JASA, 138, 2015) demonstrated that in an elastic half-space with strong cubic anisotropy, an additional supersonic surface wave appears alongside the classical Rayleigh wave. In this paper, the angular dependences of each of these two modes are investigated using a semi-analytical integral approach. The effect of multiple wavefronts associated with a single root of the characteristic equation is demonstrated, as well as a sharp increase in the amplitude of the additional wave in certain directions, accompanied by a significant slowing and weakening of the original Rayleigh wave in these directions.

Keywords: arbitrary anisotropy, traveling waves, Green's matrix, integral and asymptotic representations, resonant directions, caustics.

PACS: 43.20.Bi, 43.35.Pt

Введение

Задачи моделирования распространения поверхностных акустических волн (ПАВ), возбуждаемых заданным источником в произвольно-анизотропных упругих волноводах, возникают при ультразвуковом неразрушающем контроле слоистых композитов, в акустоэлектронике, сейсмоакустике и других практических приложениях. Анизотропия приводит к зависимости от направления распространения скорости и амплитудно-частотных характеристик квази-цилиндрических ПАВ, возбуждаемых локализованным поверхностным источником, вплоть до появления дополнительных волн и каустик с резонансным ростом амплитуды [1-3]. В частности, было обнаружено, что для упругого полупространства с кубической анизотропией в определенных направлениях возможно формирование дополнительных сверхзвуковых поверхностных волн при значительном замедлении и ослаблении исходной рэлеевской [4]. Все это существенно усложняет как волновую картину, так и методы, необходимые для получения количественных характеристик отдельных мод. Численные методы, базирующиеся на сеточной аппроксимации, такие как метод конечных элементов (МКЭ), дают количественные данные, но только для суммарного волнового поля. При этом выделение характеристик отдельных мод из полученного массива численного решения требует дополнительной, нередко затратной постпроцессорной обработки.

Появление дополнительных сверхзвуковых ПАВ было показано в работе [4] на основе анализа графиков поверхности элементов матрицы Грина на плоскости волновых чисел, нормированных на частоту (см. ниже рис. 1, *а*). В настоящей работе для детального анализа характеристик каждой из возбуждаемых мод мы используем хорошо зарекомендовавший себя интегральный подход, который позволяет получить их явное, физически наглядное представление через матрицу Грина рассматриваемой структуры и параметры источника [5,6]. Проанализированы угловые диаграммы волновых чисел (медленностей) и амплитуд каждой из возбуждаемых здесь мод. Показано, что усложнение угловой зависимости рэлеевского полюса, обусловленное кубической анизотропией, приводит к возникновению в некоторых направлениях нескольких ПАВ, ассоциированных с одним корнем характеристического уравнения (эффект множественности волновых фронтов) и появлению резонансных пиков амплитуды сверхзвуковых волн, связанных с дополнительным корнем, в тех направлениях, где рэлеевская волна полностью угасает.

1. Интегральное и асимптотическое представление волнового поля

Рассматриваются установившиеся гармонические колебания $\boldsymbol{u}(\boldsymbol{x})e^{-i\omega t}$ упругого анизотропного полупространства, занимающего в декартовых координатах $\boldsymbol{x} = (x,y,z)$ объем $|x|,|y|<\infty, z\le 0$. Его механические свойства определяются упругими модулями C_{ij} и плотностью ρ. Источником колебаний является нагрузка $\boldsymbol{q}(x,y)e^{-i\omega t}$, приложенная к поверхности $z = 0$ в некоторой ограниченной области Ω; $\omega = 2\pi f$ – круговая частота, f – частота; гармонический множитель $e^{-i\omega t}$ в дальнейшем опущен.

Решение соответствующей краевой задачи выписывается в виде обратного преобразования Фурье F_{xy}^{-1} от произведения Фурье-символов матрицы Грина $\mathrm{K} = F_{xy}[\mathrm{k}]$ и вектора поверхностной нагрузки $\boldsymbol{Q} = F_{xy}[\boldsymbol{q}]$ [5,6]:

$$\boldsymbol{u}(\boldsymbol{x}) = F_{xy}^{-1}[\boldsymbol{U}] = \frac{1}{(2\pi)^2}\int_{\Gamma_1}\int_{\Gamma_2} \mathrm{K}(\alpha_1,\alpha_2,z)\boldsymbol{Q}(\alpha_1,\alpha_2)e^{-i(\alpha_1 x+\alpha_2 y)}d\alpha_1 d\alpha_2. \qquad (1)$$

Контуры интегрирования Γ_1, Γ_2 идут вдоль вещественной оси, отклоняясь в комплексную плоскость параметров α_1,α_2 (компонент волнового вектора) при обходе полюсов и точек ветвления элементов матрицы K в соответствии с принципом предельного поглощения.

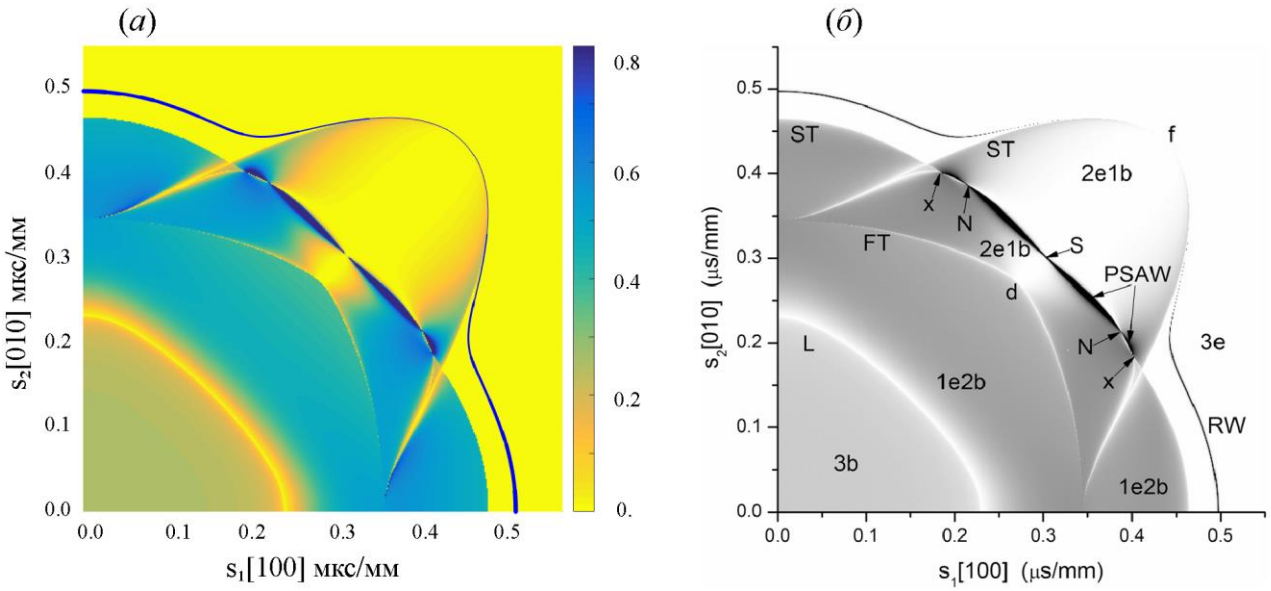


Рис. 1. Тестовое сопоставление поверхности элемента матрицы Грина на плоскости компонент вектора медленности $\boldsymbol{s}=(s_1,s_2)$, $s_i = \alpha_i/\omega$, i = 1,2 с аналогичным графиком из работы [4] для упругого полупространства с кубической анизотропией (кристаллическая медь): (а) – поверхность Im $K_{33}(s_1,s_2,0)$, (б) – Im $G_{33}(\mathbf{s}_{\|})$ из работы [4]. Темные области и линии указывают на максимальные значения в окрестности зон сингулярности (полюса, точки ветвления), вклад которых в асимптотику дает ПАВ. На рис. (*б*) в обозначениях [4], RW – траектория рэлеевского полюса, PSAW – вклад комплексного полюса, дающего сверхзвуковые псевдоповерхностные волны (ППАВ).

Для контроля на рис. 1 дано сопоставление поверхности мнимой части элемента матрицы Грина K_{33} над плоскостью компонент волнового вектора, нормированного на частоту ω (т.е. медленности $\mathbf{s} = (s_1, s_2, 0)$: $s_i = \alpha_i/\omega$, i = 1,2) с аналогичной поверхностью, приведенной в работе [4] для полупространства с кубической анизотропией; упругие модули C_{11} = 169, C_{12} = 122 и C_{44} = 75.3 гПа, плотность ρ = 8950 кг/м^3 (кристаллическая медь). Их

совпадение подтверждает эквивалентность используемых представлений и достоверность полученных численных результатов.

Переход к полярным координатам: $x = r\cos\varphi,\ y = r\sin\varphi$ и $\alpha_1 = \alpha\cos\gamma, \alpha_2 = \alpha\sin\gamma$, замыкание контуров интегрирования, применение теории вычетов и метода стационарной фазы позволяет получить из представления (1) асимптотику возбуждаемых ПАВ [5-7]:

$$\boldsymbol{u}(\boldsymbol{x}) = \sum_{n=1}^{N} \boldsymbol{u}_n(\boldsymbol{x}) + O((\kappa r)^{-1}), \quad \kappa r \to \infty, \tag{2}$$

$$\boldsymbol{u}_n(r,\varphi,z) = \sum_{m=1}^{M_n} \boldsymbol{a}_{nm}(\varphi,z) e^{iS_{nm}(\varphi)r} / \sqrt{\kappa r}, \tag{3}$$

$$\boldsymbol{a}_{nm} = \sqrt{2i\kappa / (\pi s_n''(\gamma_{nm}))} R_n(\theta_{nm}, z)\boldsymbol{Q}(-s_{nm}, \varphi), \quad \mathrm{R}_n(\gamma, z) = \frac{i}{2}\zeta_n(\theta)\mathrm{resK}(\alpha,\gamma,z)|_{\alpha=\zeta_n}$$

$$s_{nm} = s_n(\gamma_{nm}), \quad s_n(\gamma) = \zeta_n(\theta)\sin\gamma, \quad \theta = \gamma + \varphi + \pi/2;$$

κ – характерное волновое число, ζ_n – полюса элементов матрицы K, γ_{nm} – стационарные точки фазовой функции $s_n(\gamma)$, т.е. корни уравнения $s_n'(\gamma) = 0$, которое сводится к виду

$$\zeta_n'(\theta)/\zeta_n(\theta) = -\mathrm{ctg}\,\gamma \quad \Rightarrow, \quad \gamma = \gamma_{nm}, \ \theta_{nm} = \gamma_{nm} + \varphi + \pi/2, \quad m = 1,2,...,M_n \tag{4}$$

Слагаемые суммы (3) описывают квази-цилиндрические волны, ассоциированные с полюсом ζ_n; M_n – их число, оно может меняться в зависимости от направления распространения волн φ. Величины $s_{nm}(\varphi)$ в показателях экспонент играют роль волновых чисел.

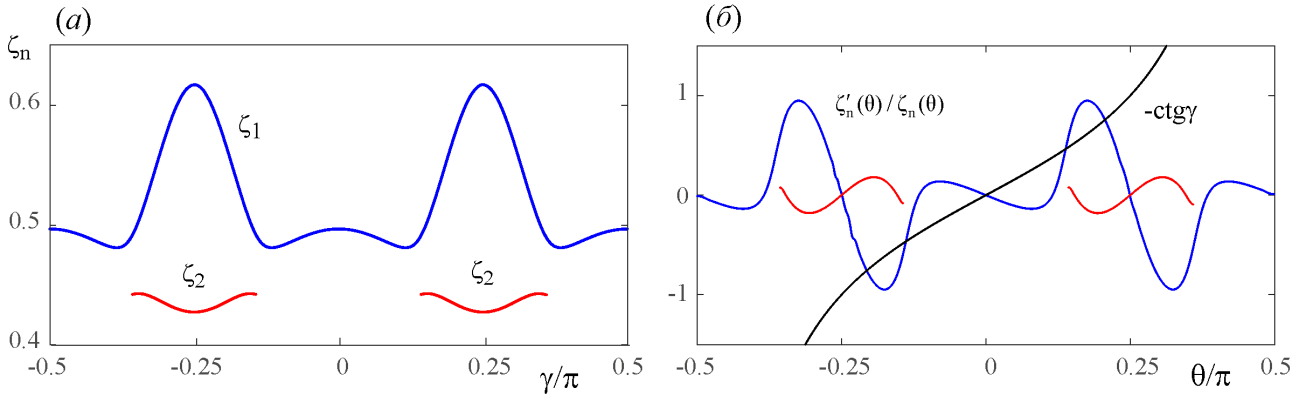


Рис. 2. (а) Угловые диаграммы полюсов $\zeta_n(\theta)$ для кристаллической меди. (б) Графики правой и левой части уравнения (4); их точки пересечения дают стационарные точки θ_{nm} и волновые числа s_{nm} для асимптотики (2) – (3); положение графика котангенса зависит от φ в соответствии с соотношением $\gamma = \theta - \varphi - \pi/2$, на рис. (б) он показан для $\varphi = 0$; при вариации φ он смещается, что дает зависимость θ_{nm} и s_{nm} от направления φ (см. ниже рис. 3).

2 Диаграммы направленности амплитуд ПАВ

2.1 Угловые зависимости волновых характеристик отдельных мод

На рис. 2, *а* показана зависимость исходного рэлеевского полюса ζ_1 и появившегося из-за анизотропии дополнительного полюса ζ_2 от полярного угла γ для рассматриваемого материала. Рисунок 2, *б* иллюстрирует механизм появления нескольких корней θ_{nm}

уравнения (4) (точек пересечения кривых $\zeta_n'(\theta)/\zeta_n(\theta)$ с графиком -ctgγ) и их изменения в зависимости от направления φ и, соответственно, угла $\gamma = \theta - \varphi - \pi/2$. В изотропном случае $\zeta_n' = 0$ для всех φ и единственная точка пересечения $\theta_{11} = 0$ дает в асимптотике (2) – (3) классическую цилиндрическую рэлеевскую волну. Получающаяся зависимость стационарных точек (углов θ_{nm}) и волновых чисел s_{nm} (при $\omega = 1$ это фактически медленности) показаны на рис. 3, *а, б.*

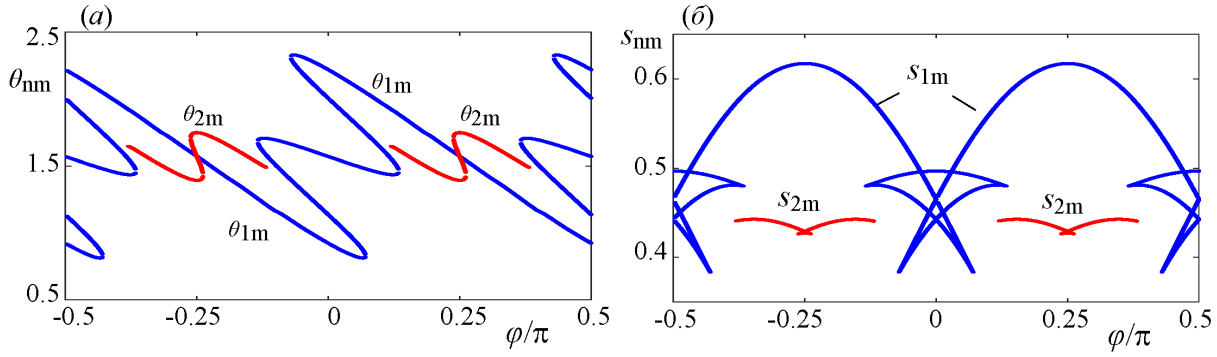


Рис. 3. (*а*) Зависимость стационарных точек θ_{nm} – корней уравнения (4), от направления φ; (*б*) соответствующая зависимость медленностей s_{nm} (φ) для квази-цилиндрических ПАВ в рассматриваемом материале с кубической анизотропией.

2.2 Множественность волновых фронтов, каустики и резонанс амплитуд

Графики, приведенные на рис. 2 – 3, показывают, что для рассматриваемого материала из-за невыпуклости полярных кривых $\alpha = \zeta_n(\gamma)$ возникает эффект множественности волновых фронтов, когда один корень характеристического уравнения ζ_n дает в некоторых направлениях несколько волн, распространяющихся с разными скоростями (на рис. 3, *б* показаны обратные к ним медленности). Представление (2) – (3) дает возможность оценить вклад каждой из них в суммарную амплитуду волнового поля, в частности, прояснить роль сверхзвуковых ПАВ, обнаруженных в работе [4].

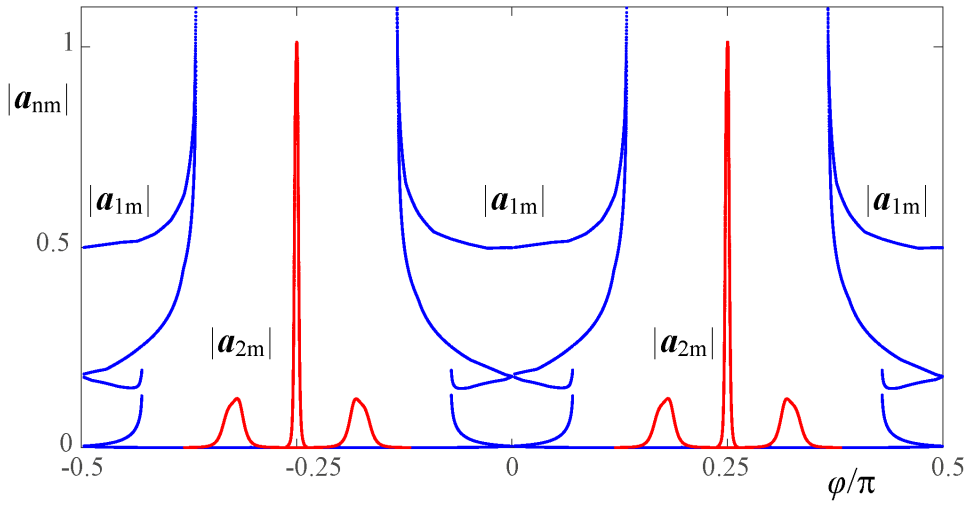


Рис. 4. Угловые диаграммы амплитуд $|\boldsymbol{a}_{nm}|$ каждой из мод ПАВ, показанных на рис. 3, б, возбуждаемых в рассматриваемом примере вертикальной точечной нагрузкой.

На рис. 4 приводятся угловые зависимости амплитуд $|\boldsymbol{a}_{nm}|$ каждой из мод ПАВ, показанных на рис. 3, б, возбуждаемых при действии вертикальной точечной нагрузки $\boldsymbol{q}$ = (0,0,$\delta(x,y)$) ($\boldsymbol{Q}$ = (0,0,1)). Интересно, что несмотря на то, что рэлеевский полюс ζ_1 присутствует во всем диапазоне изменения угла γ, связанные с ним волны фактически распространяются только в тех направлениях, где наблюдается эффект множественности волновых фронтов (на рис. 4 – в центре и по краям приведенного диапазона). Эти диапазоны ограничены направлениями $\varphi/\pi \approx \pm 0.125$, в которых амплитуды неограниченно растут (проявление каустик). Между ними ($|\varphi/\pi \pm 0.125| < 0.125$) скорость единственной волны, связанной с полюсом ζ_1 становится минимальной (медленность s_{11} на рис. 3, *б* максимальна), а амплитуда практически нулевой. Взамен появляются острые резонансные пики амплитуды быстрой волны, ассоциированной с дополнительным полюсом ζ_2 , появление которого обусловлено сильной кубической анизотропией материала.

Заключение

Работа выполняется при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект РНФ № 24-11-00140).

Список литературы

1. *Федоров Ф.И.* Теория упругих волн в кристаллах. М.: Наука. 1965. 388 с.
2. *Alshits V.I., Lothe J.* Some basic properties of bulk elastic waves in anisotropic media // Wave Motion. 2004. **40**. P. 297–313.
3. *Lane C.* Wave Propagation in Anisotropic Media. In: The Development of a 2D Ultrasonic Array Inspection for Single Crystal Turbine Blades. Springer Theses. Cham: Springer. 2014.
4. *Every A.G.* Supersonic surface acoustic waves on the 001 and 110 surfaces of cubic crystals. // J. Acust. Soc. Am. 2015. **138**(5). P. 2937–2944.
5. *Глушков Е.В., Глушкова Н.В., Кривонос А.С.* Возбуждение и распространение упругих волн в многослойных анизотропных композитах // Прикл. математика и механика. 2010. **74**(3). С. 419–432.
6. *Glushkov E., Glushkova N., Eremin A.* Forced wave propagation and energy distribution in anisotropic laminate composites // J. Acoust. Soc. Am. 2011. **129**(5). P. 2923–2934.
7. *Глушков Е.В., Глушкова Н.В., Варелджан М.В.* Сравнительный анализ эффективности программной реализации полуаналитических методов расчета волновых полей в многослойных анизотропных композитах // Вестн. ЮУрГУ. Сер. Матем. моделирование и программирование. 2022. **15**(2). С. 56–69.

УДК: 534.2 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39482

Применение ультразвука для определения упругих свойств и пористости алюмоматричных композитов

К.В. Курашкин

Центр машиноведения, Институт прикладной физики РАН, 603024, Нижний Новгород, ул. Белинского, 85, Россия.
E-mail: kurashkinkv@yandex.ru

Аннотация: Литые алюмоматричные композиты из-за особенностей технологии изготовления зачастую имеют локальные неоднородности и дефекты структуры, которые влияют на их свойства и нередко приводят к браку при изготовлении изделий. Для таких композитов и изделий из них особенно актуальна потребность в сплошном стопроцентном неразрушающем контроле. На сегодняшний день дешевый, оперативный и надежный ультразвуковой контроль является самым распространенным инструментом для неразрушающей оценки литых алюмоматричных композитов. Анализ параметров распространения ультразвуковых волн позволяет определить эффективные упругие свойства, пористость и концентрацию упрочняющих частиц, оценить однородность структуры. В докладе рассматривается проблема определения эффективных упругих свойств и пористости литого алюмоматричного композита, упрочненного многослойными углеродными нанотрубками, по данным ультразвуковых измерений.

Ключевые слова: ультразвуковой контроль, алюмоматричный композит, упругие свойства, пористость

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00922, https://rscf.ru/project/25-29-00922/, регистрационный номер НИОКТР 125021702350-8.

Application of ultrasound for evaluation of elastic properties and porosity of aluminum matrix composites

K.V. Kurashkin

The Center of Machine Science, Institute of Applied Physics RAS. Nizhny Novgorod 603024, Russia.
E-mail: kurashkinkv@yandex.ru

Abstract: Due to the peculiarities of production technology, cast aluminum matrix composites often have local heterogeneities and structural flaws that affect their properties and not infrequently lead to defects in the manufacture. For such composites and products made from them, the need to carry out complete 100% nondestructive testing is particularly relevant.

Today, cheap, prompt and reliable ultrasonic inspection is the most common tool for nondestructive evaluation of cast aluminum matrix composites. The analysis of the propagation parameters of ultrasonic waves makes it possible to determine the effective elastic properties, porosity and concentration of reinforcing particles, and to evaluate the uniformity of the structure. The report discusses the problem of determining the effective elastic properties and porosity of cast aluminum matrix composite reinforced with multi-walled carbon nanotubes based on ultrasonic measurements.

Keywords: ultrasonic testing, aluminum matrix composite, elastic properties, porosity

PACS: 43.35.Cg, 43.35.Zc

*The study was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No. 25-29-00922, https://rscf.ru/project/25-29-00922/.

Введение

В последние годы алюмоматричные композиты, имеющие низкую плотность, высокую удельную прочность и высокую удельную жесткость, получили применение в автомобилестроении и аэрокосмической технике при изготовлении легких конструкционных деталей [1,2]. Самым простым, дешевым и универсальным способом изготовления алюмоматричных композитов является литье с механическим замешиванием в расплав упрочняющих частиц или волокон наполнителя. Однако такой способ изготовления имеет существенный недостаток, заключающийся в высокой вероятности неоднородного распределения и коагуляции упрочняющих частиц или волокон наполнителя, а также образования пор [3]. Так как свойства литых алюмоматричных композитов предопределяются дефектами структуры и концентрацией армирующей фазы [3-6], то для заготовок и изделий из них особенно актуальна потребность в неразрушающем контроле качества. На сегодняшний день самым распространенным инструментом для неразрушающей оценки литых алюмоматричных композитов является дешевый, простой и надежный ультразвуковой контроль. Анализ параметров распространения ультразвуковых волн позволяет локально определить эффективные упругие свойства, пористость и концентрацию наполнителя [3-10].

Целью данного исследования являлось определение с помощью ультразвуковых измерений эффективных упругих свойств и пористости образцов перспективного литого алюмоматричного композита, дисперсно-упрочненного многослойными углеродными нанотрубками.

1 Теория

Для изотропного твердого тела скорости объемных ультразвуковых волн, модули упругости и плотность материала связаны с помощью хорошо известных уравнений, например,

$$V_{\mathrm{L}} = \sqrt{\left(K + \tfrac{4}{3}G\right)/\rho} \text{ и } V_{\mathrm{S}} = \sqrt{G/\rho}\,, \tag{1}$$

где V_{L} – скорость продольной волны, V_{S} – скорость сдвиговой волны, K – модуль объемного сжатия, G – модуль сдвига, ρ – плотность.

Как модули упругости, так и плотность алюмоматричного композита, а, следовательно, и скорости ультразвуковых волн существенно зависят от пористости и концентрации армирующего наполнителя [3-6].

Определив плотность и скорости продольных и сдвиговых волн, можно вычислить эффективные модули упругости материала

$$K = \rho\left(V_{\mathrm{L}}^2 - \frac{4}{3}V_{\mathrm{S}}^2\right) \text{ и } G = \rho V_{\mathrm{S}}^2. \tag{2}$$

В самом простом приближении, что рассматриваемый материал представляет собой однородное изотропное твердое тело со сферическими включениями, эффективные модули упругости могут быть выражены как [11]

$$K = K_{\mathrm{m}}\left\{1 - \frac{\left(1 - K_{\mathrm{i}}/K_{\mathrm{m}}\right)}{1 + \left(K_{\mathrm{i}} - K_{\mathrm{m}}\right)/\left(K_{\mathrm{m}} + \frac{4}{3}G_{\mathrm{m}}\right)}\upsilon\right\} \text{ и } G = G_{\mathrm{m}}\left\{1 - \frac{15\left(1-\nu_{\mathrm{m}}\right)\left(1 - G_{\mathrm{i}}/G_{\mathrm{m}}\right)}{\left(7 - 5\nu_{\mathrm{m}}\right) + 2\left(4 - 5\nu_{\mathrm{m}}\right)G_{\mathrm{i}}/G_{\mathrm{m}}}\upsilon\right\}, \tag{3}$$

где υ – объемная доля включений, K_{m} – модуль объемного сжатия матрицы, G_{m} – модуль сдвига матрицы, ν_{m} – коэффициент Пуассона матрицы, K_{i} – модуль объемного сжатия включений, G_{i} – модуль сдвига включений.

Коэффициент Пуассона матрицы может быть выражен через модули упругости как

$$\nu_{\mathrm{m}} = \frac{3K_{\mathrm{m}} - 2G_{\mathrm{m}}}{6K_{\mathrm{m}} + 2G_{\mathrm{m}}}. \tag{4}$$

Для случая, когда модули включений много больше модулей матрицы, то есть $K_{\mathrm{i}} >> K_{\mathrm{m}}$ и $G_{\mathrm{i}} >> G_{\mathrm{m}}$, из (3) с учетом (4) следуют следующие выражения:

$$K = K_{\mathrm{m}}\left(1 + \left(1 + \frac{4G_{\mathrm{m}}}{3K_{\mathrm{m}}}\right)\upsilon\right) \text{ и } G = G_{\mathrm{m}}\left(1 + \frac{5}{6} \times \frac{3K_{\mathrm{m}} + 4G_{\mathrm{m}}}{K_{\mathrm{m}} + 2G_{\mathrm{m}}}\upsilon\right). \tag{5}$$

Интересно отметить, что при таком приближении эффективные модули упругости не зависят от модулей упругости включений.

В предположении, что матрица содержит поры сферической формы, модули упругости матрицы могут быть выражены в зависимости от пористости как [12]

$$K_{\text{m}} = \frac{4K_0G_0(1-\varphi)}{4G_0+3K_0\varphi} \text{ и } G_{\text{m}} = G_0\left(1-5\frac{3K_0+4G_0}{9K_0+8G_0}\varphi\right), \quad (6)$$

где K_0 и G_0 – модуль объемного сжатия и модуль сдвига матрицы без пор, а φ – пористость.

В конечном счете, из (5) и (6) с учетом только линейных по υ и φ слагаемых получаются следующие выражения для эффективных модулей упругости:

$$K = K_0\left(1+\left(1+\frac{4G_0}{3K_0}\right)\upsilon-\left(1+\frac{3K_0}{4G_0}\right)\varphi\right) \text{ и } G = G_0\left(1+\frac{5}{6}\times\frac{3K_0+4G_0}{K_0+2G_0}\upsilon-5\frac{3K_0+4G_0}{9K_0+8G_0}\varphi\right). \quad (7)$$

Решив систему уравнений (7), можно определить пористость и объемную долю включений.

2 Эксперимент

В работе исследовались образцы литого композита на основе алюминиевого сплава АК12, армированного многослойными углеродными нанотрубками. Композит был разработан и получен ранее исследователями из НГТУ им. Р.Е. Алексеева и ИМХ им. Г.А. Разуваева РАН [13]. В табл. 1. представлен химический состав исследованных образцов, который определялся с помощью рентгенофлуоресцентного анализатора МЕТАЛЛТЕСТ.

Таблица 1

Химический состав образцов композита

Номер образца	Массовая доля элемента, %							Наполнитель
	Al	Si	Cu	Fe	Mn	Mg	Zn	
1	86.9	11.1	0.5	0.5	0.3	0.5	0.1	Многослойные углеродные нанотрубки
2	84.9	13.2	0.5	0.5	0.3	0.4	0.1	
3	85.0	13.2	0.5	0.5	0.3	0.5	0.1	
4	85.6	12.5	0.5	0.5	0.3	0.4	0.1	
5	84.1	13.8	0.6	0.5	0.3	0.5	0.1	

Ультразвуковые исследования проводились эхо-методом на образцах круглого сечения диаметром 25 мм и толщиной 9 мм. Продольные и сдвиговые волны возбуждались и принимались широкополосными пьезоэлектрическими преобразователями Olympus V110 и V156 с центральной частота 5 МГц. Для генерации электрических импульсов использовался ультразвуковой дефектоскоп ACS A1212 MASTER. Запись амплитудно-временных диаграмм выполнялась с помощью цифрового осциллографа LA-n1USB с частотой дискретизации 1 ГГц и программного обеспечения ADCLab. Для определения скорости распространения ультразвуковых волн использовались первый и второй донные сигналы. Дифференциальные измерения между эхо-сигналами позволили свести к минимуму влияние толщины контактного слоя. Для каждого измерения использовалось 50 реализаций временной

развертки осциллографа в режиме накопления. На каждом образце измерения повторялись 10 раз.

Скорости рассчитывались с помощью следующих выражений:

$$V_L = 2h/t_L \text{ и } V_S = 2h/t_S, \quad (8)$$

где h – толщина образца, измеренная микрометром, t_L и t_S и – времена распространения продольных и сдвиговых волн соответственно.

Плотность образцов определялась стандартным методом гидростатического взвешивания с использованием лабораторных весов Веста АВ60-01.

Через плотность и скорости распространения ультразвуковых волн по формулам (2) рассчитывались эффективные модули упругости материала.

Пористость вычислялась с помощью следующего выражения, полученного из (7):

$$\varphi = \frac{(9K_0 + 8G_0)(8(K_0 + 2G_0)(G - G_0) - 20G_0(K - K_0))}{5(3K_0 + 4G_0)^2(3K_0 - 4G_0)}. \quad (9)$$

При вычислениях использовались значения K_0 = 75 ГПа и G_0 = 27 ГПа.

Для независимой количественной оценки пористости применялся оптический микроскоп Altami MET 3M и программное обеспечение для обработки изображений и анализа микроструктуры.

В табл. 2 приведены определенные в ходе эксперимента характеристики образцов.

Таблица 2

Характеристики образцов композита

Номер образца	ρ, кг/м^3	V_L, м/с	V_S, м/с	K, ГПа	G, ГПа	$\varphi_{уз}$, %	$\varphi_{опт}$, %
1	2688	6704	3262	82.7	28.6	-3.4	0.3
2	2624	6486	3212	74.3	27.1	0.6	1.8
3	2548	6341	3185	68.0	25.8	3.6	2.4
4	2592	6472	3221	72.7	26.9	1.5	1.3
5	2651	6593	3242	78.1	27.9	-1.1	0.4

На рис. 1 показаны скорости продольных и сдвиговых волн в исследованных образцах композита в зависимости от их плотности. Как видно на рис. 1, скорости объемных волн довольно сильно коррелируют с фактической плотностью композита.

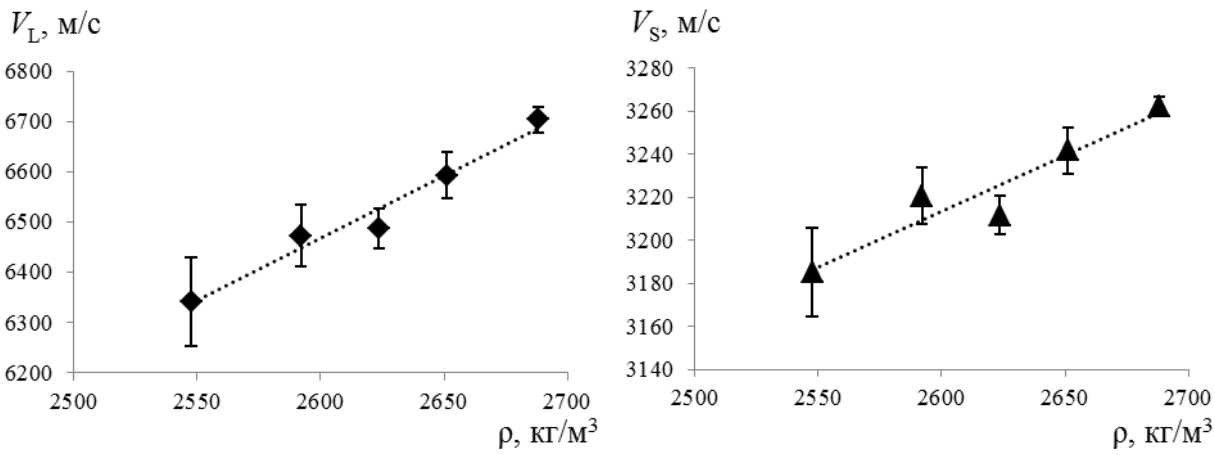


Рис. 1. Скорости продольных (а) и сдвиговых (б) волн в зависимости от плотности композита

На рис. 2 изображены взаимосвязи между модулями упругости и пористостью, определенной с помощью оптического микроскопа. Полученные экспериментально значения модулей упругости лежат выше или на прямой, соответствующей значениям, рассчитанным с помощью выражений (6) без учета влияния упрочняющих включений. Логично, что увеличение пористости приводит к уменьшению модулей упругости. Увеличение концентрации многослойных углеродных нанотрубок приводит к увеличению модулей упругости, так как модули упругости многослойных углеродных нанотрубок на порядок больше, чем модули упругости алюминия [14]. Очевидно, что исследованные образцы композита содержат разное количество упрочняющего наполнителя.

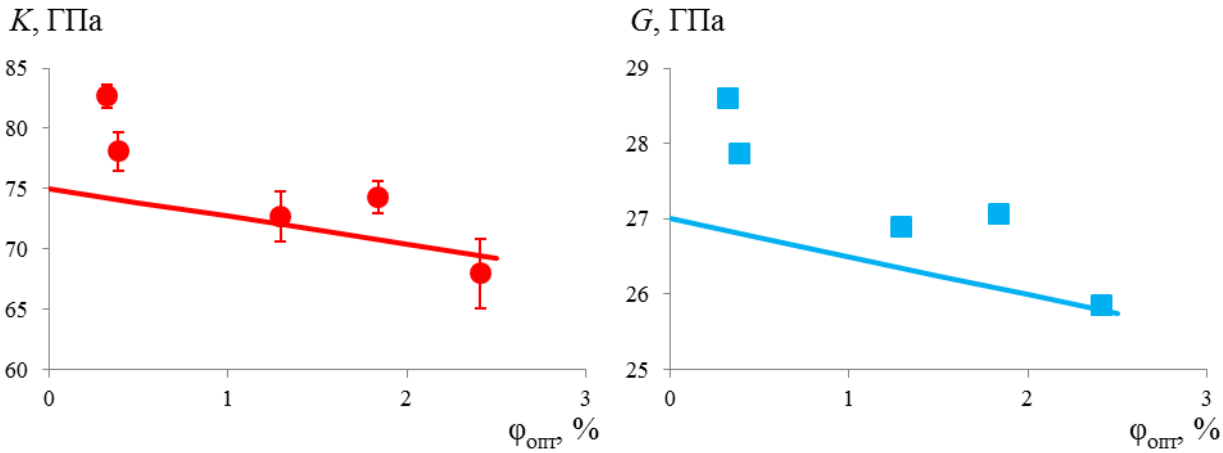


Рис. 2. Модуль объемного сжатия (а) и модуль сдвига (б) в зависимости от пористости композита: символы – экспериментальные данные, сплошные линии – расчет по формулам (6)

На рис. 3 показаны значения пористости, полученные оптическим и ультразвуковым методами. Как следует из полученных данных, использование предложенного подхода и расчета по формуле (9) позволяет получить полуколичественную оценку пористости. В принципе, предлагаемый подход может применяться для оперативной разбраковки алюмоматричных композитов, армированных многослойными углеродными нанотрубками.

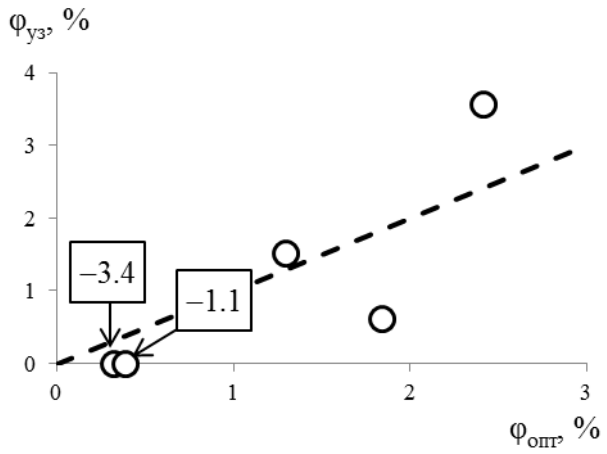


Рис. 3. Значения пористости, определенные оптическим и ультразвуковым методами

Заключение

Экспериментально установлено, что эффективные модули упругости перспективного алюмоматричного композита, армированного многослойными углеродными нанотрубками, существенно изменяются в зависимости от пористости и концентрации наполнителя. В рамках простейшей линейной модели можно оценить пористость и провести разбраковку заготовок по данным ультразвукового контроля и определения плотности.

Список литературы

1. *Chak V., Chattopadhyay H., Dora T.L.* A review on fabrication methods, reinforcements and mechanical properties of aluminum matrix composites // JMP. 2020. **56**. P. 1059. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.05.042
2. *Garg P., Jamwal A., Kumar D., Sadasivuni K.K., Hussain C.M., Gupta P.* Advance research progresses in aluminium matrix composites: manufacturing and applications // JMR&T. 2019. **8**. P. 4924. DOI: 10.1016/j.jmrt.2019.06.028
3. *Rohatgi P.K., Raman S., Majumdar B.S., Banerjee A.* Ultrasonic techniques in evaluation of metal matrix particulate composites // Mat. Sci. Eng. A. 1990. **123**. P. 89. DOI: 10.1016/0921-5093(90)90214-n
4. *Lee J.-H, Park Y.-Ch.* Nondestructive characterization of metal matrix composite by ultrasonic measurement // Compos. Eng. 1995. **5**. P. 1423. DOI: 10.1016/0961-9526(95)00076-y
5. *Gür C.H., Ogel B.* Non-destructive microstructural characterization of aluminium matrix composites by ultrasonic techniques // Mater. Charact. 2001. **47**. P. 227. DOI: 10.1016/s1044-5803(01)00174-7
6. *Bindumadhavan P.N., Wah H.K., Prabhakar O.* // Mat. Sci. Eng. A. 2002. **323**. P. 42. DOI: 10.1016/s0921-5093(01)01399-5

7. *Karabutov A.A., Podymova N.B.* Influence of the porosity on the dispersion of the phase velocity of longitudinal acoustic waves in isotropic metal-matrix composites // Acoust. Phys. 2017. **63**. P. 288. DOI: 10.1134/S106377101703006X
8. *Podymova N.B., Kalashnikov I.E., Bolotova L.K., Kobeleva L.I.* Laser-ultrasonic nondestructive evaluation of porosity in particulate reinforced metal-matrix composites // Ultrasonics. 2019. **99**. Art. 105959. DOI: 10.1016/j.ultras.2019.105959
9. *Toozandehjani M., Ostovan F., Shamshirsaz M. Matori Kh.A., Shafiei E.* Velocity and attenuation of ultrasonic wave in Al–Al_2O_3 nanocomposite and their correlation to microstructural evolution during synthesizing procedure // JMR&T. 2021. **15**. P. 2529. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.09.065
10. *Podymova N.B., Karabutov A.A.* The influence of porosity on the statistical amplitude distribution of backscattered ultrasonic pulses in reactive cast metal–matrix composites // Acoust. Phys. 2021. **67**, P. 47. DOI: 10.1134/S1063771021010073
11. *Christensen R.M.* Mechanics of composite materials. Wiley. New York, 1979.
12. *Mackenzie J.K.* The elastic constants of a solid containing spherical holes // Proc. Phys. Soc. B. 1950. **63**. P. 2. DOI: 10.1088/0370-1301/63/1/302
13. *Romanov A.D., Romanova E.A., Mironov A.A. Kikeev V.A., Obiedkov A.M., Kaverin B.S., Vilkov I.V.* Developing a technology for obtaining an aluminum matrix composite reinforced with multi-walled carbon nanotubes // Metallurgist. 2024. **68**. P. 427. DOI: 10.1007/s11015-024-01744-z
14. *Eletskii A.V.* Mechanical properties of carbon nanostructures and related materials // Phys. Usp. 2007. **50**. P. 225. DOI: 10.1070/PU2007v050n03ABEH006188

УДК: 534.29; 537.635; 548.4 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39483

Особенность ядерной спин-фононной связи в высокоомных кристаллах GaAs

А.М. Рочев [a], В.М. Микушев, Е.В. Чарная, Д.Ю. Нефедов

Санкт-Петербургский государственный университет, Физический факультет, Россия, 198504, Санкт-Петербург, Петродворец, Ульяновская ул., д. 1

E-mail: [a] a.rochev@spbu.ru

Аннотация: Важнейшим вопросом магнитной квантовой акустики является природа ядерного спин-фононного взаимодействия в различных материалах. Эффективность взаимодействия тепловых фононов с ядерными спинами определяет скорость спин-решёточной релаксации ядер, которая регистрируется методами ядерного магнитного резонанса (ЯМР). Применение на спектрометре ЯМР Bruker Avance 400 оригинальной методики подавления вклада парамагнитных центров в ядерную релаксацию позволило установить характер взаимодействия электронных центров с соседними ядерными спинами галлия и мышьяка в номинально чистом и легированных высокоомных кристаллах арсенида галлия. Температурные зависимости скоростей различных вкладов в спин-решеточную релаксацию в диапазоне от 50 до 300 К показали, что наличие примесей хрома или меди в кристаллах не меняет доминирующей роли квадрупольного взаимодействия электронных центров с ближайшими ядерными спинами обоих изотопов галлия. Для ядерных спинов ^{75}As во всех образцах заметен вклад магнитной суперсверхтонкой связи. Это согласуется с независимыми данными о большей эффективности магнитного суперсверхтонкого взаимодействия электронных центров с ^{75}As. Легирование медью и хромом практически не сказывается на скорости и характере ядерной спин-решеточной релаксации мышьяка.

Ключевые слова: ядерное спин-фононное взаимодействие, магнитное насыщение линии ЯМР, высокоомные кристаллы GaAs.

Feature of nuclear spin-phonon coupling in GaAs semi-insulator crystals

A.M. Rochev[a], V.M. Mikushev, E.V. Charnaya, D.Yu. Nefedov

St. Petersburg State University, Physics faculty, Russia, 198504, St. Petersburg, Petrodvoretz, Ulyanovskaya 1

E-mail: [a]a.rochev@spbu.ru

Abstract: A key question in magnetic quantum acoustics is the nature of nuclear spin-phonon interactions in various materials. The efficiency of interaction of thermal phonons with nuclear

spins determines the rate of nuclear spin-lattice relaxation, which is recorded by nuclear magnetic resonance (NMR). Application of the unique technique for suppressing the contribution of paramagnetic centers using a Bruker Avance 400 NMR spectrometer allowed us to determine the nature of the interaction of electron centers with the neighbor nuclear gallium and arsenic spins in nominally pure and doped gallium arsenide semi-insulator crystals. Temperature dependences of the rates of various contributions to spin-lattice relaxation within the range from 50 to 300 K showed that the presence of chromium or copper impurities in the crystals does not alter the dominant role of the quadrupole interaction of electron centers with the nearest nuclear spins of both gallium isotopes. For the ^{75}As nuclear spins, a contribution from magnetic superhyperfine coupling is noticeable. This is consistent with independent data demonstrating the greater efficiency of the magnetic superhyperfine interaction of electron centers with ^{75}As. Doping with copper and chromium has virtually no effect on the rate and nature of arsenic nuclear spin-lattice relaxation.
Keywords: nuclear spin-phonon interaction, magnetic saturation of the NMR line, semi-insulator GaAs crystals

PACS: 43.35.Xd, 76.60.−k.

Введение

Материалы на основе высокоомных кристаллов арсенида галлия как чистых, так и легированных, нашли широкое применение в современных технических устройствах, например, кристаллы, легированные хромом, используются для полупроводниковых детекторов рентгеновских систем визуализации [1]. Разработка новых объективных методов контроля и исследования ловушечных электронных центров в таких материалах необходима для оптимизации их свойств. Собственные дефекты в высокоомных кристаллах GaAs, такие как электронные центры EL2, и примесные ионы влияют на эффективность связи фононов и ядерных спинов, что сказывается на скорости ядерной спин-решеточной релаксации. Для твердотельных диэлектриков суммарная скорость восстановления термодинамического равновесия ядерных спинов с системой тепловых фононов имеет вид:

$$\left(T_1^{\Sigma}\right)^{-1} = \left(T_1^{lat}\right)^{-1} + \left(T_1^{ec}\right)^{-1}. \quad (1)$$

Время спин-решеточной релаксации T_1^{lat} за счет «решёточного» вклада для ядер, обладающих электрическим квадрупольным моментом, определяется взаимодействием квадрупольных моментов ядер с динамическими градиентами электрических полей, возникающих при модуляции межатомных расстояний тепловыми фононами [2]. Время релаксации с участием электронных центров T_1^{ec} обусловлено быстрой релаксацией ядерных спинов, расположенных вблизи электронных центров, благодаря суперсверхтонкой связи [2]

с электронным центром и выравниванием ядерной намагниченности по объему кристалла с участием спиновой диффузии.

Экспериментальная методика разделения вкладов в спин-решеточную релаксацию квадрупольных ядер была предложена в работах [3, 4]. Недавно эта методика была распространена на современные коммерческие спектрометры ядерного магнитного резонанса (ЯМР) [5] и дополнительно усовершенствована с использованием более точных аппроксимаций кривых восстановления намагниченности [6, 7]. В настоящей работе проведено разделения вкладов в релаксацию для изотопов галлия и мышьяка в высокоомных номинально чистых и легированных кристаллах GaAs в диапазоне температур 50÷300 К.

1. Образцы и методика эксперимента

Образцы представляют собой монокристаллы GaAs с удельным сопротивлением при комнатной температуре 10^8 Ом см: нелегированный, имеющий концентрацию неконтролируемых примесей не более 10^{15} см^3; и легированные хромом и медью с концентрациями 10^{17} см^3.

Время восстановления сигналов ЯМР к равновесным значениям после инверсии измерялось на спектрометре Bruker Avance III 400 в условиях стационарного магнитного насыщения ядерной спин-системы по методике, описанной в [6]. Уровень стационарного насыщения характеризуется фактором $Z^{st}=A^{st}/A_0$, где A^{st} и A_0 - интегральные равновесные интенсивности линий ЯМР при насыщении и без него. Время восстановления ядерной намагниченности в этом случае равно [8, 9]:

$$\tau = Z^{st} T_1. \qquad (2)$$

Зависимость относительной интегральной интенсивности ЯМР-сигнала $Z(t)=A(t)/A_0$ от времени задержки t между импульсами π и $\pi/2$ измерялась при факторах насыщения Z^{st} в диапазоне от 0.2 до 1.0. Для отрицательных $Z(t)$ наблюдалась экспоненциальная зависимость:

$$Z(t) = Z^{st}\left[1 - b\exp\left(-t/\tau_1\right)\right], \qquad (3)$$

независимо от величины Z^{st}. Здесь b – численный коэффициент (b<2), зависящий от степени инверсии ядерной намагниченности после π-импульса. Соотношение (3) и линейная зависимость τ_1 от Z^{st} (2) сохраняются для положительных $Z(t)$ при факторах насыщения, не превышающих пороговый Z_{th}^{st}. При более сильном насыщении ($Z^{st} < Z_{th}^{st}$) восстановление ядерной намагниченности при положительных значениях $Z(t)$ не является экспоненциальным и хорошо описываются соотношением:

$$Z(t) = Z^{st}\left\{1 - \rho\exp\left[-\left(t-t_0\right)/\tau_1\right] - (1-\rho)\exp\left[-\left(t-t_0\right)/\tau_2\right]\right\}, \qquad (4)$$

где ρ – доля ядерных спинов в образце, которые релаксируют со временем τ_1, t_0 – время

задержки, соответствующее $Z(t)=0$. Появление второй экспоненты демонстрирует ослабление спин-фононного взаимодействия для части (1-ρ) ядерных спинов.

2. Результаты и их обсуждение

Полученные времена τ_1 и τ_2 позволяют рассчитать времена спин-решеточной релаксации T_1^{Σ} и T_1^{lat} соответственно, а затем оценить время релаксации T_1^{ec} из выражения (1). На рис. 1, *а* для примера показаны результаты измерений τ_1 и τ_2 для ^{75}As при 200 К в нелегированном кристалле GaAs. На рис. 1, *б* показаны соответствующие значения доли ядерных спинов (1-ρ), для которых подавлен вклад электронных центров в релаксацию.

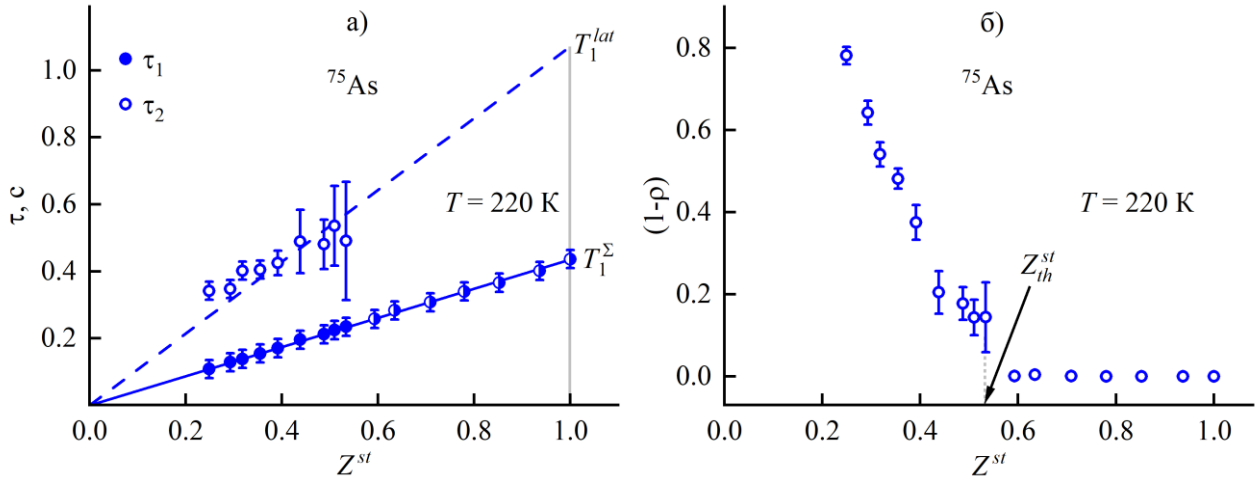


Рис. 1. (а) - Времена восстановления сигналов ЯМР изотопа ^{75}As для различных значений фактора Z^{st} при 220 К; (б) - Доля ядерных спинов (1-ρ), для которых подавлен вклад в спин-решеточную релаксацию с участием электронных центров.

На рис. 2 линиями показаны температурные зависимости скоростей спин-решеточной релаксации $\left(T_1^{\Sigma}\right)^{-1}$, $\left(T_1^{lat}\right)^{-1}$ и $\left(T_1^{ec}\right)^{-1}$ изотопов галлия в нелегированном GaAs, полученные в [8]. Символы демонстрируют результаты измерений в кристаллах, легированным хромом и медью. Из рис. 2 следует, что легирование GaAs не влияет на скорости релаксации для обоих изотопов галлия в рассматриваемом температурном диапазоне. Подчеркнем, что в пределах экспериментальной ошибки отношения между соответствующими скоростями релаксации для ^{69}Ga и ^{71}Ga пропорциональны отношению квадратов их квадрупольных моментов.

На рис. 3 представлены зависимости от температуры скоростей релаксации ^{75}As в нелегированном кристалле и кристалле, легированном медью.

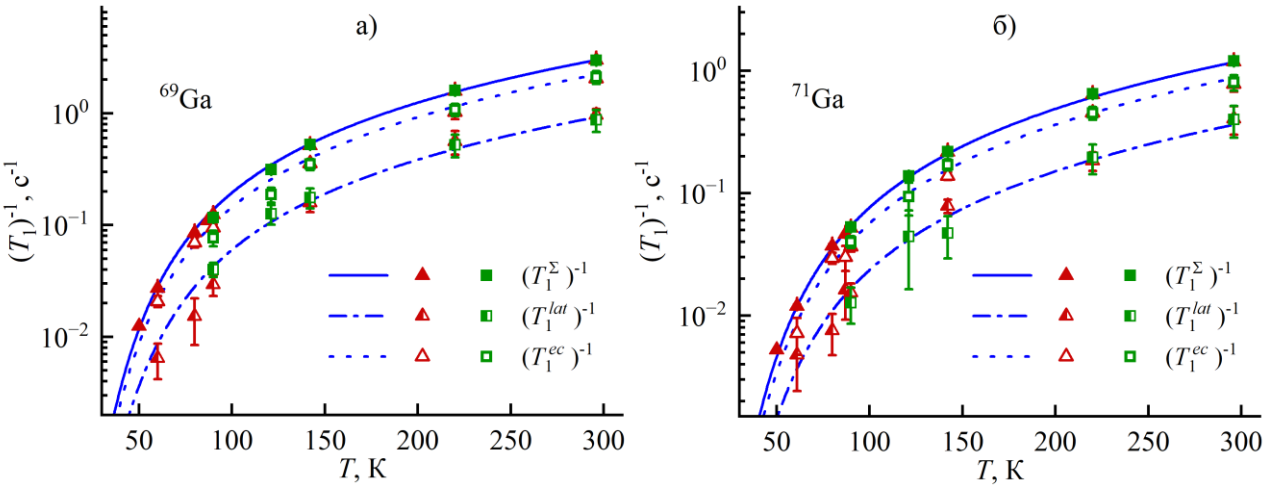


Рис. 2. Скорости спин-решеточной релаксации для (а) - ^{69}Ga и (б) - ^{71}Ga в высокоомных кристаллах GaAs, легированных хромом (квадраты) и медью (треугольники).

Из рис. 3 видно, что «решёточный» вклад T_1^{lat} в релаксацию ^{75}As согласуется с теоретическими предсказаниями для релаксации квадрупольных ядер в диэлектриках [2]. В то же время изменения с температурой T_1^{Σ} и T_1^{ec} не описываются этой моделью ниже 100 К. Такие результаты могут быть объяснены более сильной магнитной связью электронных центров с соседними ядрами мышьяка по сравнению с ядрами галлия. В высокоомных кристаллах GaAs основной вклад в релаксацию, вероятно, вносят центры EL2, включающие структурные дефекты As_{Ga} , которые могут связываться с акцепторной примесью.

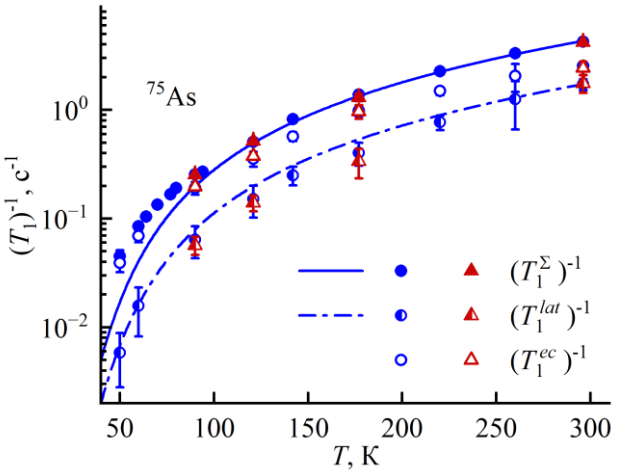


Рис. 3. Изменения с температурой скоростей релаксации ^{75}As в нелегированном (кружки) и легированном медью (треугольники) кристаллах GaAs. Кривые – теоретические зависимости для квадрупольной релаксации [2].

4. Заключение

Наблюдение восстановления ядерной намагниченности после инверсии в условиях стационарного магнитного насыщения спин-системы ядер позволило разделить вклады в спин-решеточную релаксацию галлия и мышьяка в высокоомном GaAs. Показано, что легирование медью и хромом в пределах погрешности не сказывается на скорости

релаксации в диапазоне от 50 до 300 К. Температурные зависимости «решеточного» вклада согласуются с моделью квадрупольной релаксации для всех исследованных ядер. Обнаружено, что скорости суммарной релаксации и релаксации через электронные центры ядер ^{75}As отклоняются от теоретических предсказаний для квадрупольной релаксации.

Измерения проводились на оборудовании Ресурсного центра Научного парка СПбГУ “Центр диагностики функциональных материалов для медицины, фармакологии и наноэлектроники” при частичном финансировании в рамках инициативного проекта СПбГУ INI_2026 (Pure ID: 147095248).

Список литературы

1. *Трофимов М.С., Яковлев Н.Н.* Адмиттансные характеристики сенсоров на основе арсенида галлия, компенсированного хромом // ФТТ. 2026. **68**, № 1. С. 3.

2. *Абрагам А., Гольдман М.* Ядерный магнетизм: порядок и беспорядок: в 2-х томах. Мир. М., 1984.

3. *Charnaya E.V., Mikushev V.M., Shabanova E.S.* Direct measurements of impurity and lattice components of the nuclear spin-lattice relaxation in Al_2O_3 crystals // J. Phys.: Condens. Matter. 1994. **6**, N 37. P. 7581.

4. *Charnaya E.V., Mavlonazarov I., Mikushev V.M.* Separating of Lattice and Impurity Contributions in Nuclear-Spin-Lattice Relaxation Under Steady Saturation // J. Magn. Reson. A. 1995. **112**, N 1. P. 96.

5. *Mikushev V.M., Charnaya E.V., Lee M.K., Chang L.-J.* Suppression of the defect contribution to nuclear spin-lattice relaxation by long rf magnetic pulses for the particular case of ^{23}NaCl // Results Phys. 2019. **12**. P. 1202.

6. *Микушев В.М., Рочев А.М., Чарная Е.В.* Ослабление спин-фононной связи квадрупольных ядер в кристаллах NaF в условиях магнитного насыщения // Акуст. журн. 2023. **69**. № 6. С. 695.

7. *Рочев А.М., Микушев В.М., Чарная Е.В., Серов А.Ю.* Особенности разделения механизмов спин-фононного взаимодействия для ^{23}Na в кристалле NaF в зависимости от температуры и количества парамагнитных центров // Акуст. журн. 2024. **70**. № 5. С. 672.

8. *Rochev A.M., Mikushev V.M., Charnaya E.V.* Quadrupole Spin–Lattice Relaxation of ^{69}Ga and ^{71}Ga in a GaAs Semi-insulator Crystal // Appl. Magn. Reson. 2025. **56**. N 8. P. 1045.

9. *Charnaya E.V., Mikushev V.M., Ulyashev A.M., Yas'kov D.A.* Suppression of impurity relaxation in a γ-irradiated NaCl crystal.// Physica B. 2000. **292**, N 1-2. P. 109.

УДК: 547.022; 544.171 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39484

Изменение фазового состава пленок ПВДФ и П(ВДФ-ТрФЭ) при электрической поляризации и механических воздействиях

Сороколетова Н.А.[1,a], Беляев С.Н.[1], Касьянов Д.А.[1], Дерябин М.С.[1,2], Белов Д.В.[1]

[1] Федеральный исследовательский центр «Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова Российской академии наук», Нижний Новгород

[2] ННГУ им. Н.И. Лобачевского; Нижний Новгород

E-mail: [a]n.sorokoletova@ipfran.ru

Аннотация: Поливинилиденфторид (ПВДФ) является поликристаллическим полимером, который широко применяется в различных областях промышленности благодаря своей высокой химической, термической стойкости и полиморфизму. ПВДФ может содержать полиморфные кристаллические фазы: α, β, γ, ε и δ. Однако наиболее распространенными являются α-фаза, полярная β-фаза и γ-фаза. Наибольшим пьезоэлектрическим модулем d_{33} обладает перпендикулярно ориентированная полярная β-фаза. В работе были получены полимерные пленки ПВДФ и П(ВДФ-ТрФЭ) (80/20 мол.) из растворов полимеров в триэтилфосфате (ТЭФ). Полученные пленки поляризовали и подвергали механическим воздействиям: одноосному растяжению и одноосному сжатию. Образцы пленок анализировали с помощью рентгенофазового анализа и ИК-спектроскопии. По результатам исследования было выявлено снижение степени кристалличности пленок ПВДФ и П(ВДФ-ТрФЭ) после механических воздействий и поляризации. Однако степень кристалличности снижалась благодаря уменьшению содержания α- и γ-фаз в пленках, в то время как содержание β-фазы росло. Была установлена зависимость между ориентацией β-фазы относительно плоскости пленки и типом воздействия. При поляризации и одноосном растяжении пленки ПВДФ и П(ВДФ-ТрФЭ) β-фаза ориентировалась преимущественно параллельно плоскости пленки, в то время как при одноосном сжатии пленок значительная часть β-фазы ориентировалась перпендикулярно.

Ключевые слова: поливинилиденфторид, рентгенофазовый анализ, пьезоэлектрические свойства.

Changes in the phase composition of PVDF and P(VDF-TrFE) films under electric polarization and mechanical influences

N.A. Sorokoletova [1,a]., S.N. Belyaev [1], D.A. Kasyanov [1], M.S. Deryabin [1,2], D.V. Belov[1]

[1] Federal research center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences (IAP RAS), Nizhny Novgorod
[2] National Research Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod, Nizhny Novgorod
E-mail: [a]n.sorokoletova@ipfran.ru

Abstract: Polyvinylidene fluoride (PVDF) is a polycrystalline polymer that is widely used in various fields of industry due to its high chemical and thermal resistance and polymorphism. PVDF can contain polymorphic crystalline phases: α, β, γ, ε and δ. However, the most common are the α-phase, the polar β-phase, and the γ-phase. The largest piezoelectric module d33 has a perpendicularly oriented polar β-phase. In this work, polymer films PVDF and P(VDF-TrFE) (80/20 mol.) were obtained from polymer solutions in triethyl phosphate (TEF). The obtained films were polarized and subjected to mechanical influences: uniaxial stretching and uniaxial compression. The film samples were analyzed using X-ray phase analysis and IR spectroscopy. According to the results of the study, a decrease in the degree of crystallinity of PVDF and P (VDF-TrFE) films after mechanical influences and polarization was revealed. However, the degree of crystallinity decreased due to a decrease in the content of α- and γ-phases in the films, while the content of the β-phase increased. A relationship was established between the orientation of the β-phase relative to the film plane and the type of exposure. During polarization and uniaxial stretching of PVDF and P(VDF-TrFE) films, the β-phase was oriented mainly parallel to the film plane, while during uniaxial compression of films, a significant part of the β-phase was oriented perpendicular.
Keywords: polyvinylidene fluoride, X-ray phase analysis, piezoelectric properties.

Введение

Фазовый состав полимерных материалов определяет их функциональные свойства, такие как пьезо-, пиро- и ферроэлектрические характеристики. Механическая обработка (например, одноосное растяжение) и поляризация являются ключевыми методами индуцирования фазового перехода α → β [1]. Известно [2, 3], что механическое одноосное растяжение индуцирует переориентацию β-фазы из состояния с преимущественной ориентацией полярной оси перпендикулярно плоскости пленки в состояние с ориентацией в плоскости пленки.

1. Описание эксперимента

Сополимер П(ВДФ-ТрФЭ) (80/20 мол) и полимер ПВДФ (Ф-2М) растворяли в триэтилфосфате (ТЭФ). Полученные растворы полимеров с концентрацией 10% (масс.)

заливали в изложницы размерами 60x30x3 мм и высушивали в вакуумном сушильном шкафу при температуре не выше 100 ºС и давлении 0.1 бар в течение 3.5 ч.

Растяжение литых из раствора пленок полимеров проводилось на универсальной испытательной машине РМ-1-А-05 Subramax со скоростью 1 мм/мин до достижения напряжения 35 Н для образцов П(ВДФ-ТрФЭ) и 15 Н для пленок ПВДФ. Прессование литых из раствора пленок полимеров проводили на настольном гидравлическом масляном прессе с усилием 40 МПа. Поляризация осуществлялась контактным методом. Образцы зажимались между двумя электродами и погружались в трансформаторное масло. Температура масла повышалась с 40°С до 95°С. Подаваемое поляризующее напряжение при изменении температуры менялось в диапазоне от 1 кВ до 9 кВ. Рентгенофазовый анализ (РФА) порошков и пленок проводился на дифрактометре “SHIMADZU XDR 6000” (SHIMADZU, Япония). ИК-спектроскопию пленок проводили на ИК-Фурье-спектрометре SILab i-Red 7800u-L (“Beijing Beifen-Ruili Analytical Instrument”, Китай) с детектором из $LiTaO_3$, рабочий диапазон волновых чисел 350–5500 $см^{-1}$, разрешение 0.85 $см^{-1}$. Спектры регистрировали относительно воздуха.

2. Обсуждение результатов.

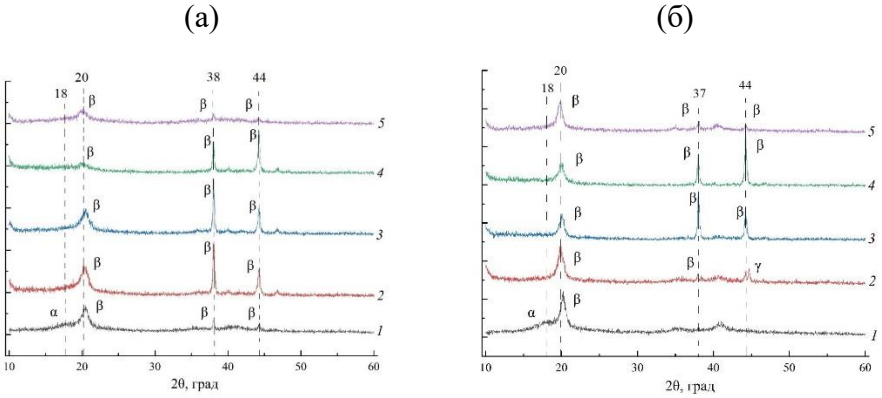


Рис. 1. Спектры рентгеновской дифракции образцов полимера ПВДФ (а) и П(ВДФ-ТрФЭ) (б) (80/20 мол.): порошок (*1*), пленка, литая из раствора (*2*), поляризованная пленка (*3*), пленка после растяжения (*4*), пленка после сжатия (*5*).

Фазовый состав пленки, полученной литьем из раствора ПВДФ (рис. 1а, 2), характеризуется уменьшением интенсивности сигнала α-фазы и заметным увеличением интенсивности рефлексов β-фазы во всей области углов.

После поляризации пленки ПВДФ (рис. 1а, *3*) интенсивность сигнала β-фазы при углах и 35–45º сохранилась на том же уровне. Сигнал рефлекса β-фазы при 20º уширился относительно дифрактограммы пленки (рис. 1а, *2*). Аморфный рефлекс около 18º практически не определяется, что говорит о крайне малом содержании α-фазы. Рост интенсивности рефлекса при 20º и снижение интенсивности рефлекса около 18º говорят об увеличении содержания перпендикулярно ориентированной кристаллической β-фазы.

После растяжения пленки (рис. 1а, *4*) наблюдается уменьшение сигнала от рефлекса β-фазы в области 20° с заметным увеличением сигналов рефлексов в диапазоне 35–45°. Это указывает на параллельную переориентацию β-фазы [4, 5]. После сжатия пленки (рис. 1а, *5*), интенсивность сигнала β-фазы в области 20° возрастает, а сигналы рефлексов на углах 35–45° значительно снижаются, а сигнал α-фазы не наблюдается.

Пленка, полученная литьем из раствора сополимера (рис. 1б, *2*), характеризуется расщеплением основного пика β-фазы в области 20°, и появлением рефлексов в области 35–45°. Наличие дублета в области 44° указывает на присутствие кристаллической γ-фазы [4]. При поляризации пленки (рис. 1б, *3*) происходит усиление интенсивности рефлексов в области 35–45°, соответствующих параллельной ориентации β-фазы [5]. Растяжение пленки (рис. 1б, *4*) приводит к увеличению интенсивности сигналов около 35–45° и снижению интенсивности сигнала при 20°. В пленке П(ВДФ-ТрФЭ) после одноосного сжатия (рис. 1б, 5) снижаются интенсивности рефлексов в области 35–45°, а интенсивность рефлекса около 20° значительно возрастает.

На основании спектров рентгеновской дифракции образцов полимеров рассчитали их степень кристалличности (χ) (табл. 1) по формулам:

$$\chi = \frac{\sum I_{крист}}{\sum I_{крист} + I_{аморф}} \quad (1)$$

$$\chi = \frac{\sum S_{крист}}{\sum S_{крист} + S_{аморф}} \quad (2)$$

Таблица 1. Степень кристалличности ПВДФ и П(ВДФ-ТрФЭ) (80/20 мол.), рассчитанная по отношению интенсивностей рефлексов (χ_I) и по соотношению их площадей (χ_S) на дифрактограммах.

Вид материала	Степень кристалличности (χ)			
	ПВДФ		П(ВДФ-ТрФЭ) (80/20 мол.)	
	χ_I	χ_S	χ_I	χ_S
порошок	0.67	0.50	0.59	0.48
пленка, литая из раствора	0.92	0.94	0.82	0.93
поляризованная пленка	0.93	0.89	0.95	0.94
пленка после одноосного растяжения	0.74	0.74	0.81	0.77
пленка после одноосного сжатия	0.68	0.63	0.77	0.79

По результатам (табл. 1) можно сделать вывод о снижении содержания кристаллической фазы в пленках ПВДФ после растяжения, сжатия и поляризации. Максимальная степень кристалличности П(ВДФ-ТрФЭ) наблюдается в поляризованной пленке.

ИК-спектроскопия пленок ПВДФ и П(ВДФ-ТрФЭ). На рис. 2 приведены результаты ИК-спектроскопии пленок ПВДФ (а) и П(ВДФ-ТрФЭ) (б).

Для количественной оценки содержания β-фазы в смеси кристаллических фаз рассчитали долю электроактивной фазы ω_{EA} в пленках полимеров по формуле (3):

$$\omega_{EA} = \frac{I_{EA}}{(\frac{K_{840}}{K_{770}})\, I_{770} + I_{EA}} \cdot 100\% \quad (3)$$

где I_{EA} и I_{770} интенсивности полос поглощения при 840 см$^{-1}$ и 770 см$^{-1}$ соответственно, K_{840} коэффициент поглощения при длине волны 840 см$^{-1}$, равный $7.7 \cdot 10^4$ см^2/моль, K_{770} коэффициент поглощения при длине волны 770 см$^{-1}$, равный $6.1 \cdot 10^4$ см^2/моль [6]. Затем, используя полученное значение доли электроактивной фазы ω_{EA} полимера, рассчитали содержание β-фазы ω(β) по формуле (4):

$$\omega(\beta) = \omega_{EA} \cdot \left(\frac{\Delta H_\beta}{\Delta H_\beta + \Delta H_\gamma}\right) \cdot 100\% \quad (4)$$

где ΔH_β разница интенсивностей полосы поглощения при 1273 см$^{-1}$ (1275, 1277 см$^{-1}$) и базовой полосы при 1260 см$^{-1}$, ΔH_γ разница интенсивностей полосы поглощения 1230 см$^{-1}$ (1232, 1233 см$^{-1}$) и базовой полосы при 1225 см$^{-1}$. Результаты расчета приведены в табл. 2.

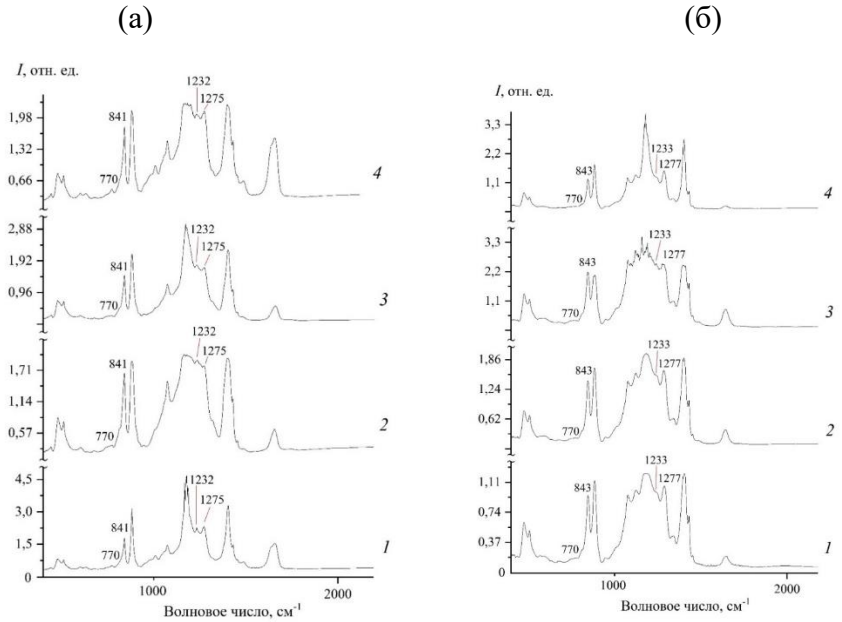


Рис. 2. ИК-спектры ПВДФ (а) и П(ВДФ-ТрФЭ) 80/20 мол. (б): 1 – пленка литая из раствора, 2 – пленка после электрической поляризации, 3 – пленка после одноосного растяжения, 4 – пленка после одноосного сжатия.

Таблица 2. Содержание β-фазы в пленках ПВДФ и П(ВДФ-ТрФЭ).

Образец пленки	ω_{EA}, %		ω(β), %	
	ПВДФ	П(ВДФ-ТрФЭ)	ПВДФ	П(ВДФ-ТрФЭ)
Полученный литьем из раствора	73.3	80.9	37.6	74.2
Поляризованный	78.9	83.3	25.7	77.8
После одноосного растяжения	81.8	82.4	44.5	58.8

После одноосного сжатия	74.7	83.0	47.9	76.6

Заключение

Была проведена количественная оценка содержания β-фазы в пленках полимеров ПВДФ. Электрическая поляризация снижает ее содержание, а одноосное растяжение и одноосное сжатие повышают ее содержание. В пленках П(ВДФ-ТрФЭ) содержание β-фазы повышается при электрической поляризации и при одноосном сжатии. Одноосное растяжение пленки П(ВДФ-ТрФЭ) понижает содержание β-фазы. Несмотря на это при одноосном сжатии β-фаза в пленках преимущественно перпендикулярно ориентирована. Данные результаты показывают, что определёнными механическими и электрическими воздействиями можно управлять ориентацией β-фазы полимеров ПВДФ и П(ВДФ-ТрФЭ) и, таким образом, влиять на соотношение пьезоэлектрических модулей d_{33} и d_{31} сегнетоэлектрических плёнок.

Список цитируемой литературы

[1] *Furukawa T.* Ferroelectric properties of vinylidene fluoride copolymers // Ph. Transit., **18** № 3-4 (1989) 143-211. https://doi.org/10.1080/01411598908206863

[2] *Tashiro K., Takano K., Kobayashi M., et al.* Structural study on ferroelectric phase transition of vinylidene fluoride-trifluoroethylene copolymers (III) dependence of transitional behavior on VDF molar content // Ferroelectrics., **57** № 1 (1984) 297-326. https://doi.org/10.1080/00150198408012770

[3] *Rinaldo G.Jr.* Determination of the α, β, and γ crystalline phases of poly(vinylidene fluoride) films prepared at different conditions // J. Appl. Polym. Sci., **100** № 4. (2006). P. 3272-3279. https://doi.org/10.1002/app.23137

[4] *Xu H., Cheng Z.-Y., Olson D., et al.* Ferroelectric and electromechanical properties of poly(vinylidene-fluoride–trifluoroethylene–chlorotrifluoroethylene) terpolymer // Appl. Phys. Lett., **78** № 16. (2001) P. 2360-2362. https://doi.org/10.1063/1.1358847

[5] *Orudzhev F., Selimov D., Rabadanova A., et al.* 1D/2D Electrospun Polyvinylidene Fluoride Nanofibers/Carbon Flakes Hybrid Nonmetal Polymeric Photo- and Piezocatalyst // ChemistrySelect., **8** № 43 (2023) e202303318. https://doi.org/10.1002/slct.202303318

УДК: 551.321.6 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39485

Характеристики ультразвукового импульса, отражённого от пресноводного и солёного льда в лабораторном эксперименте

Ю.А. Титченко[1,a], Д.А. Ковалдов[1,b], В.Ю. Караев[1,c], Е.М. Мешков[1,d], В.А. Лихоманов[2,e], А.В. Чернов[2,f]

[1] *Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук», 603951, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46.*

[2] *Федеральное государственное бюджетное учреждение «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт», 199397, г. Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38.*

E-mail: [a]yuriy@ipfran.ru, [b]d.kovaldov@ipfran.ru, [c]volody@ipfran.ru, [d]meshkovevgeny@gmail.com, [e]likhomanov96@yandex.ru, [f]chernov@aari.ru

Аннотация: Представлено сравнение результатов двух экспериментов по исследованию ультразвукового акустического импульса, отражённого ледяным покровом в рамках полного цикла замораживания и таяния ледяного покрова в лабораторных условиях. Измерения проходили в малом ледовом бассейне ААНИИ. В первом эксперименте замораживалась пресная вода, во втором соленая вода. В первом случае за первые 45 дней было заморожено 57 см толщины льда. Для соленой воды за 48 суток была заморожена толщина 33 см. В обоих экспериментах замораживание выполнялось при постоянной температуре воздуха -10°C, а таяние при температуре +10°C. На дне бассейна во всех экспериментах постоянно работал импульсный гидролокатор с частотой излучения 200 кГц. Антенна приемо-передатчика была ориентирована вертикально вверх на поверхность воды. В результате с помощью подводного гидролокатора были измерены отраженные импульсы на протяжении полных циклов замерзания и размораживания ледяного покрова. В результате анализа данных отраженного импульса была выполнена оценка динамики толщины ледяного покрова и средней скорости звука во льду.

Ключевые слова: лабораторный эксперимент, отраженный ультразвуковой импульс, толщина ледяного покрова, соленый лёд, пресный лёд.

Characteristics of ultrasonic pulses reflected from freshwater and saltwater ice in a laboratory experiment

Yu.A. Titchenko[1,a], D.A. Kovaldov[1,b], V.Yu. Karaev[1,c], E.M. Meshkov[1,d], V.A. Likhomanov[2,e], A.V. Chernov[2,f]

[1] *Department of [...], Faculty of Physics, M.V.Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia.*

[2] *Sternberg State Institute of Astronomy, Moscow State University. Moscow 119191, Russia.*

E-mail: [a]yuriy@ipfran.ru, [b]d.kovaldov@ipfran.ru, [c]volody@ipfran.ru, [d]meshkovevgeny@gmail.com, [e]likhomanov96@yandex.ru, [f]chernov@aari.ru

Abstract: This paper presents a comparison of the results of two experiments studying ultrasonic acoustic pulses reflected by ice cover during a complete freeze-thaw cycle under laboratory conditions. The measurements were conducted in the small ice tank of the Arctic and Antarctic Research Institute. In the first experiment, fresh water was frozen, while in the second, salt water was frozen. In the first experiment, 57 cm of ice thickness was frozen over the first 45 days. For the salt water, a thickness of 33 cm was frozen over 48 days. In both experiments, freezing was performed at a constant air temperature of -10°C and thawing at +10°C. A pulse sonar with a transmission frequency of 200 kHz was continuously operating at the bottom of the tank during all experiments. The transceiver antenna was oriented vertically upward toward the water surface. As a result, the underwater sonar was used to measure reflected pulses throughout complete freeze-thaw cycles of the ice cover. As a result of the analysis of the reflected pulse data, an assessment of the dynamics of the ice cover thickness and the average speed of sound in ice was made.

Keywords: laboratory experiment, reflected ultrasonic pulse, ice thickness, salt ice, freshwater ice.

PACS: 43.30.Vh, 92.40.vx

Введение

Ледяной покров Мирового океана оказывает большое влияние на климат Земли. Из-за этого определение границ, толщины и свойств ледяного покрова является важной задачей для мониторинга изменений климата? понимания процессов теплообмена в системе океан-атмосфера, обеспечения безопасности судоходства и работ на морских сооружениях арктического шельфа, а также для развития климатических моделей и улучшения прогноза погоды.

В настоящее время разработаны и широко используются несколько подходов к исследованию параметров ледяного покрова: бурение льда, методы эхолокации с

использованием сонаров, электромагнитные методы, визуальные и телевизионные наблюдения с борта судов [1]. Толщина пресноводного ледяного покрова измеряется также микроволновыми радиовысотомерами, установленными на спутниках [2].

Акустические методы, занимают особое место благодаря возможности получения непрерывных временных рядов измерений с приборов, установленных на подводных платформах. Например, существуют подводные гидролокаторы, измеряющие толщину льда на основании регистрации времени распространения акустического импульса до нижней кромки ледяного покрова в сочетании с датчиком гидростатического давления [3]. Существуют методы, определяющие полную толщину соленого льда по задержке между отражениями от границ, вода-лёд и лёд-воздух [4]. В настоящей работе представлены первые результаты лабораторных экспериментов по исследованию параметров солёного и пресноводного льда в малом ледовом бассейне ААНИИ с использованием ультразвукового гидролокатора [5].

1 Экспериментальный стенд в ААНИИ

В малом ледовом бассейне [6] Арктического и Антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ) была собрана уникальная экспериментальная установка с целью исследования рассеяния ультразвукового сигнала ледяным покровом во время полного цикла намерзания и таяния. Бассейн имеет глубину 2,5 м, длину 5 м, ширину 5 м.

Подо льдом на дне был установлен ультразвуковой гидролокатор с симметричной диаграммой направленности (ДН) антенны 15°×15°. Излучается прямоугольный импульс длительностью 4 периода синусоидального заполнения с амплитудой 100 В и частотой 200 кГц. Скважность излучённых импульсов составляет 6 Гц.

Формирование пресноводного и соленого ледяного покрова происходит под действием системы кондиционирования воздуха, которая поддерживает стабильную отрицательную температуру -10°C на всем периоде намораживания. Таяние ледяного покрова происходит при температуре +10°C. Контрольные измерения толщины льда выполнялись контактным способом с помощью взятия кернов. Пресный лед намораживается из водопроводной воды.
Соленый лед намораживается из воды, имеющей соленость около 35 ‰.

2 Акустические измерения

Подводный акустический волнограф выполнял измерения каждый час на протяжении всех экспериментов. Для анализа отраженные импульсы усреднялись за 1 минуту.

На рис. 1 представлена динамика импульса, отраженного пресноводным ледяным покровом за весь цикл измерений. Вертикальная ось соответствует значениям времени с момента излучения. Бордовая линия внизу графика соответствует зашкаливающим измерениям приёмника в момент излучения.

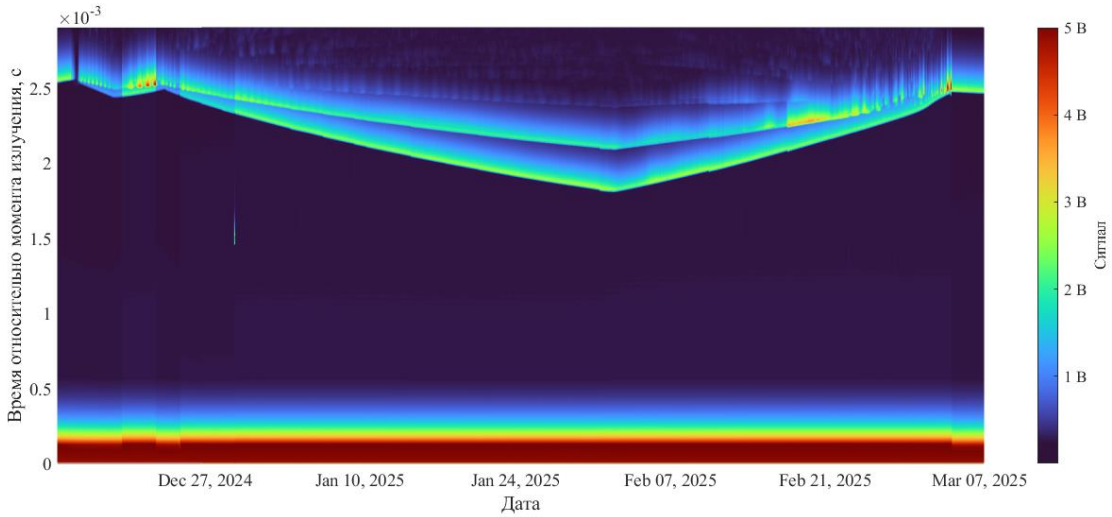


Рис. 1. Динамика отражённого импульса за весь цикл измерений.

На рис. 1 видно, что в процессе намораживания и увеличения толщины пресноводного ледяного покрова у отражённого акустического импульса формируется два локальных экстремума. Первый локальный экстремум формируется при отражении от границы вода-лёд, второй — от границы лёд-воздух.

Для соленого льда рассматривается период замораживания. На рис. 2 слева представлена трёхмерная карта для периода замораживания ледяного покрова. На рис. 2 справа приведены средние импульсы, полученные при различных толщинах ледяного покрова. В случае солёного ледяного покрова в эксперименте не удалось четко определить локальные экстремумы, соответствующие отражениям от границ ледяного покрова.

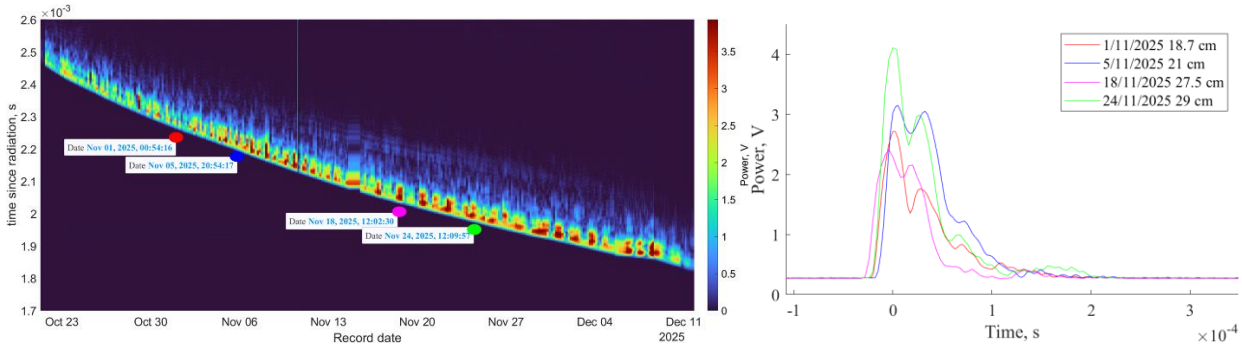


Рис 2. (слева) Карта отраженных импульсов, (справа) 4 средних импульса полученные при экспериментах в разные дни с разной толщиной ледяного покрова.

3 Восстановление толщины ледяного покрова

Разница между моментами отражения во времени и данные о толщине ледяного покрова по длине кернов позволяют рассчитать среднюю скорость звука в ледяном покрове. Получили

среднее значение скорости звука при намораживании пресноводного льда– 4026 м/с, а при размораживании– 3996 м/с. Полученные значения скорости использовали для вычисления толщины ледяного покрова за всё время работы гидролокатора. Зависимость толщины пресноводного ледяного покрова, измеренная подводным гидролокатором в сравнении с контактными измерениями от даты записи приведена на рис. 3.

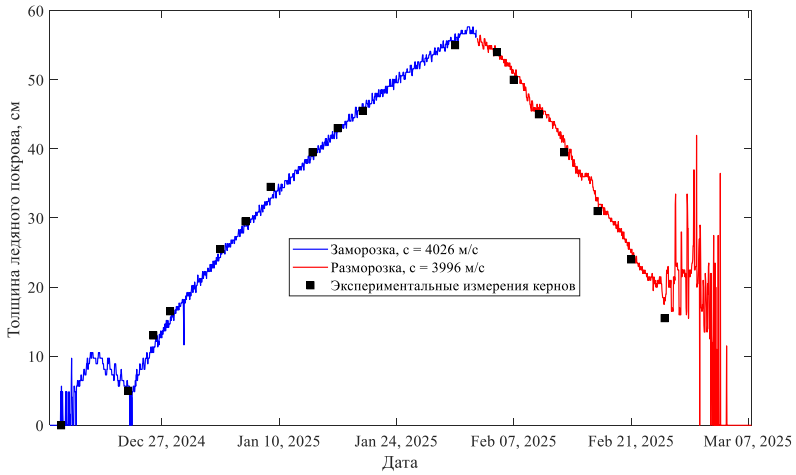


Рис. 3. Толщина ледяного покрова, рассчитанная по данным гидролокатора за весь цикл измерений. Измерения толщины льда на основе измерений кернов обозначены черными квадратами.

Для соленого льда с учётом особенностей формы отражённого импульса анализ основывался на оценке его ширины. На рис. 4а приводится пример расчёта начальной и конечной точек пороговым методом. На рис.4б приводится пример диаграммы рассеяния для ширины, рассчитанной пороговым методом с порогом 0,03 В, в таком случае коэффициентом корреляции между толщиной керна и шириной импульса ≈0,86. Далее на рис. 4в строится зависимость коэффициента корреляции от выставляемого порога.

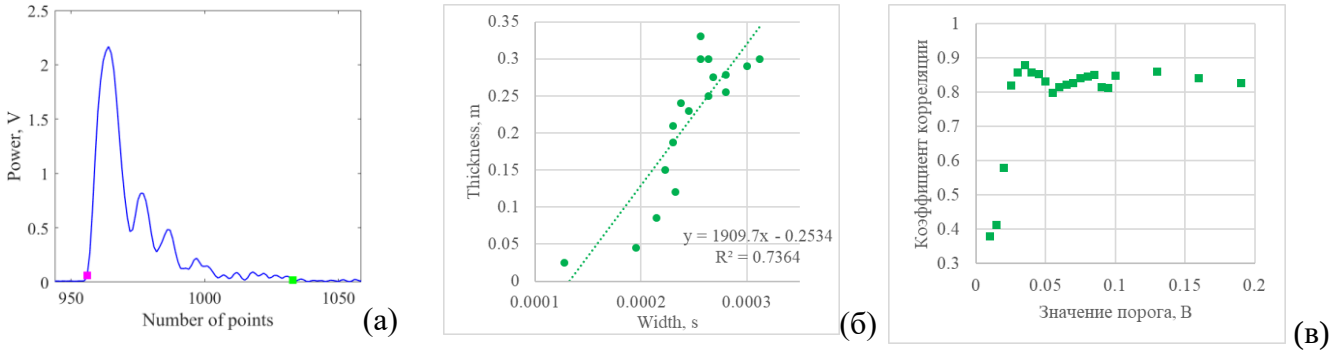


Рис. 4. (а) Пример отражённого импульса, для которого определяется "ширина", розовая точка – начало импульса, зелёная точка - конец (порог 0,03 В). (б) Диаграмма рассеяния с порогом 0,03 В; (в) Зависимость коэффициента корреляции от значения выставляемого порога;

Заключение

Анализ данных лабораторного исследования солёного ледяного покрова методами ультразвуковой подводной гидролокации выявил ряд особенностей, отличающих его от пресного льда. В отличие от пресного ледяного покрова, где пик отражённого импульса расщепляется на два чётких локальных экстремума, соответствующих границам раздела, вода–лёд и лёд–воздух, в случае солёного льда наблюдается расщепление на большее число экстремумов. Данная особенность не позволяет напрямую определить толщину ледяного покрова по временному интервалу между экстремумами, в связи с чем для анализа использовалась ширина отражённого импульса.

Для оценки связи между шириной импульса и толщиной ледяного покрова был использован метод, основанный на том, что начало и конец импульса устанавливаются в точках, где сигнал превышает заданное пороговое значение. Анализ зависимости коэффициента корреляции от величины порога показал, что максимальная корреляция 0,86 достигается при пороговом значении 0,03 В. В результате показано, что толщина пресноводного ледяного покрова уверенно восстанавливается на протяжении почти всего цикла замерзания таяния ледяного покрова. Для соленого льда так же могут быть выполнены удовлетворительные оценки толщины льда по форме отраженного импульса.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-77-10064, https://rscf.ru/project/23-77-10064/.

Список литературы

1. *Алексеева Т.А., Фролов С.В., Сероветников С.С.* Обзор методов и основных результатов измерений толщины морского льда в Арктике. // Российская Арктика. 2021. № 12. С. 33–49.

2. *Beckers J.F., Casey J.A., Haas C.* Retrievals of Lake Ice Thickness from Great Slave Lake and Great Bear Lake Using CryoSat-2. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2017. **55**, № 7. P. 3708–3720.

3. *Birch R., Fissel D.B., Melling H., Vaudrey K., Schaudt K., Heideman J., Lamb W.* Ice Profiling Sonar: Upward Looking Sonar Provides Over-Winter Records of Ice Thickness and Ice Keel Depths off Sakhalin Island, Russia. // Sea Technology. 2002.

4. *Bassett C., Lavery A.C., Lyons A.P., Wilkinson J.P., Maksym T.* Direct inference of first-year sea ice thickness using broadband acoustic backscattering. // J. Acoust. Soc. Am. 2020. **147**, № 2. P. 824–838.

5. *Titchenko Y., Karaev V., Ryabkova M., Panfilova M., Meshkov E., Yablokov A.* Experimental study of the possibility of using an underwater acoustic wave gauge in freezing waters to measure the thickness of the ice cover. // OCEANS 2019 – Marseille. Marseille, France, 2019. P. 1–5.

6. *Пацева П.В., Савицкая А.В., Крупина Н.А., Чернов А.В., Свистунов И.А., Лихоманов В.А.* Модернизированный комплекс ледовых бассейнов ФГБУ «ААНИИ». К 35-летию со дня ввода в строй. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2025. **71**, № 1. С. 46–62.

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39486

Трансформация типа моды упругой волны в структурах AL/ASN/Diamond

Бурков С.И.[1)], Пляскин М.Е.[1)], Турчин П.П.[1)2)], Турчин В.И.[1)]

[1)]Сибирский федеральный университет, город Красноярск;

[2)] Институт физики им. Л.В.Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН, город Красноярск;

Тел.: (+7 904 890 50 94); E-mail: (pturchin@sfu-kras.ru)

Исследованы дисперсионные зависимости трансформации типа упругих волн в пьезоэлектрической структуре на примере Al/($Al_{0.72}Sc_{0.28}$)N/[110](001)Diamond. Рассмотрены условия преобразования симметричных и антисимметричных мод волны Лэмба в релеевские моды и SH-мод пластины в волны Лява. Исследовано влияние интерфейса раздела слоев пьезоэлектрической структуры на трансформацию типа моды упругих колебаний. Установлены особенности влияния значений материальных констант на трансформации типа упругих колебаний.

Ключевые слова: акустические волны, многослойные структуры, волны Лэмба, волны Лява

ELASTIC WAVE MODE TYPE TRANSFORMATION IN AL/ASN/DIAMOND STRUCTURES

Burkov S.I.[1)], Plyaskin M.E.[1)], Turchin P.P.[1)2)], Turchin V.I.[1)]

[1)] Siberian Federal University Krasnoyarsk, Russian Federation;

[2)] Kirensky Institute of Physics Federal Research Center KSC SB RAS Krasnoyarsk, Russian Federation

Тел.: (+7 904 890 50 94); E-mail: (pturchin@sfu-kras.ru)

The dispersion dependences of the elastic wave type transformation in a piezoelectric structure are investigated using Al/(Al0.72Sc0.28)N/[110](001)Diamond as an example. The conditions for the transformation of symmetric and antisymmetric Lamb wave modes into Rayleigh modes and of SH plate modes into Love waves are considered. The influence of the layer interface of the piezoelectric structure on the transformation of the elastic vibration mode type is investigated. The influence of material constants on the transformation of the elastic vibration type is established.

Keywords: acoustic waves, multilayer structures, Lamb waves, Love waves

УДК: 620.179.16 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39487

Определение размеров кристаллитов в цилиндрических образцах по изображениям восстановленным методом цифровой фокусировки апертуры

А.Е. Базулин[1], Е.Г. Базулин[1], С.В. Ромашкин[1], Д.С. Тихонов[1]

[1]Научно-производственный центр «ЭХО+», Москва

тел.: +7 (495) 780-92-50, эл. почта: bazulin@echoplus.ru

Аннотация: В процессе изготовления различных заготовок возникает необходимость оценить размер зерна (кристаллитов), который определяет механические свойства материала. Традиционные металлографические исследования трудоемки и могут оценить размер зерна только на поверхности заготовки, но не внутри ее. Частотная зависимость рассеяния ультразвука от размеров зерна позволяет оценить размер зерна при анализе затухания ультразвука или при оценке амплитуды рассеянных импульсов. Метод цифровой фокусировки апертуры (ЦФА) позволяет получить с высоким разрешением информацию об амплитуде рассеянного поля. Восстановив изображения по эхосигналам, измеренным антенными решетками с рабочими частотами 2.25, 5 и 10 МГц, и, используя теорию Роуза, можно оценить размеры зерна внутри объекта контроля.

Ключевые слова: Full Matrix Capture (FMC), Total Focusing Method (TFM), цифровая фокусировка апертуры (ЦФА), теория Роуза, структуроскопия, размер кристаллитов.

Determination of crystallite sizes in cylindrical samples using images reconstructed by the digital aperture focusing method

A.E. Bazulin[1], E.G. Bazulin[1], S.V. Romashkin[1], D.S. Tikhonov[1]

[1] ECHO+ Research and Production Center, Moscow

Phone: +7 (495) 780-92-50, email: bazulin@echoplus.ru

Abstract: In the process of manufacturing various workpieces, it is necessary to evaluate the grain size (crystallites), which determines the mechanical properties of the material. Traditional metallographic studies are time-consuming and can only assess the grain size on the surface of the workpiece, but not inside it. The frequency dependence of ultrasound scattering on grain size allows for the estimation of grain size by analyzing the attenuation of ultrasound or by evaluating the amplitude of scattered pulses. The digital aperture focusing (DAF) method provides high-resolution information about the amplitude of the scattered field. By reconstructing images from the echo signals measured by antenna arrays with operating frequencies of 2.25, 5, and 10 MHz, and using the Rose theory, it is possible to estimate the grain size inside the inspection object.

Keywords: Full Matrix Capture (FMC), Total Focusing Method (TFM), digital aperture focusing (DAF), Rose theory, structurescopy, crystallite size.

PACS: 43.35.Zc

Введение

В процессе изготовления заготовок возникает необходимость оценить размер зерна (кристаллитов), который определяет механические свойства материала. Чем раньше в производственной цепочке удается оценить размер зерна, тем раньше можно забраковать заготовку и уменьшить себестоимость изделия. Традиционные металлографические исследования достаточно трудоемки и позволяют оценить размер зерна только на поверхности заготовки, но не внутри ее. Частотная зависимость рассеяния ультразвука от размеров зерна позволяет оценить размер зерна при анализе затухания ультразвука или при анализе амплитуды измеренных эхосигналов. Однако для применения ГОСТ Р 53205–2008 [1] из заготовки нужно вырезать образец для проведения измерений, а это достаточно долгий процесс, который не позволяет оперативно оценить размер зерна во всем сечении заготовки. Метод цифровой фокусировки апертуры (ЦФА) [2, 3] восстанавливает с высоким разрешением изображения с возможностью анализа амплитуды рассеянного поля на разных частотах в сечении объекта контроля. Совместный анализ изображений на разных частотах по всему сечению образца должен позволить оценить размер зерна.

1 Принцип определения размера зерна

Проблеме определения размеров зерна по измерению затухания и скорости звука в зарубежной литературе посвящены сотни работ, начиная с 1950 годов. К сожалению, в настоящее время в российском сегменте счет работ идет на единицы [4]. Так как структурный шум и скорость звука имеют частотную зависимость, то существующие методы определения балльности зерна построены на этом принципе. Была выбрана модель Роуза (Rose) [5], устанавливающая зависимость коэффициента обратного рассеяния η от среднего размера зерна a в поликристаллическом материале со случайным углом наклона кристаллических осей $\theta(\mathbf{r})$. Под коэффициентом $\eta(a)$ подразумевается акустическая мощность обратного рассеяния на единицу объема. На Рис. 1 показана зависимость коэффициента обратного рассеяния $\sqrt{\eta(a)}$ от размеров зерна a для частот 1.25, 2.5, 5 и 10 МГц. Синими вертикальными линиями с цифрами отмечены размеры зерна в соответствии с таблицей балльности [1].

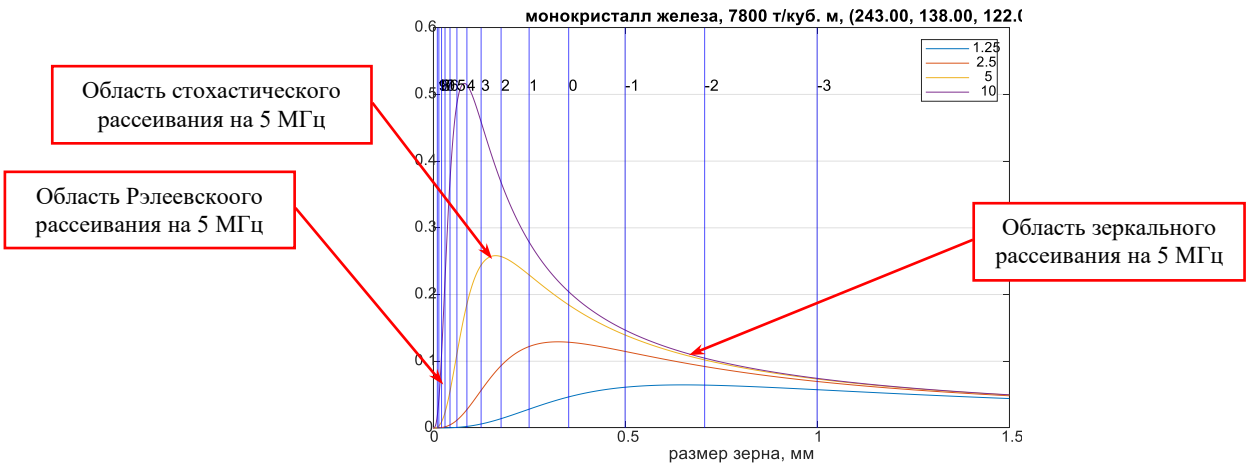


Рис. 1. Зависимость коэффициента обратного рассеяния $\sqrt{\eta(a)}$ от размеров зерна a для частот 1,25, 2,5, 5 и 10 МГц

Максимальный уровень структурного шума достигается в области стохастического рассеивания при размерах зерна в диапазоне от 0,3 до 0,4 от длины волны. Область размеров зерна левее максимумов каждой кривой можно считать областью Рэлеевского рассеивания, когда размеры отражателя много меньше длины волны. В области Рэлеевского рассеивания коэффициент затухания пропорционален четвертой степени частоты, в области стохастического рассеивания пропорционален второй степени частоты, а в зеркальной области коэффициент затухания не зависит от частоты [6].

Идея метода определения размеров зерна заключается в измерении на трех частотах 2.25, 5 и 10 МГц эхосигналов, рассеянных зернами, восстановлении изображения на каждой частоте, а сопоставление амплитуд изображений на разных частотах в соответствии с теорией Роуза (Рис. 1) позволит оценить размер зерна в любой точке области восстановления изображения и построить карту номера зерна

2 Модельные эксперименты

Модельные эксперименты проводились с использованием дефектоскопа АВГУР-АРТ, разработанного и изготовляемого в «Научно-производственном центре «ЭХО+» [7]. Из-за ограниченности полосы частот антенных решеток использовались три антенные решетки:

- 32 элементная решетка с рабочей частотой 2.25 МГц с размером элемента 1 мм и зазором между элементами 0.2 мм,
- 64 элементная решетка с рабочей частотой 5 МГц с размером элемента 0.55 мм и зазором между элементами 0.05 мм,
- 128 элементная решетка с рабочей частотой 10 МГц с размером элемента 0.25 мм и зазором между элементами 0.05 мм.

Эхосигналы в цилиндрических образцах диаметром 55 мм измерялись при сканировании с шагом 5 мм по всей цилиндрической поверхности образцов упомянутыми антенными решетками с

локальной иммерсионной ванной (Рис. 2, б). Так как рассеянные зернами эхосигналы имеют маленькую амплитуду, то возбуждающий элементы антенной решетки импульс имел амплитуду 100 В, а усиление приемных усилителей было равно 40 дБ. Это привело к тому, что работать с призмой из рексолита (Рис. 2, а) оказалось невозможно из-за огромного количества перерассеянных и трансформированных на границах призмы импульсов, несмотря на ее специальную конструкцию. Только работа с локальной иммерсионной ванной позволила уменьшить реверберационный шум до приемлемого уровня. Образец устанавливался на стенд, с помощью насоса в локальную ванну закачивалась вода (Рис. 2, б). Так как локальная ванна не плотно прилегала к образцу, то полностью заполнить ей водой было невозможно, поэтому при измерении антенная решетка располагалась внизу, чтобы всегда обеспечивать контакт. Проблема смещения антенной решетки вдоль радиуса при вращении решалась программным образом.

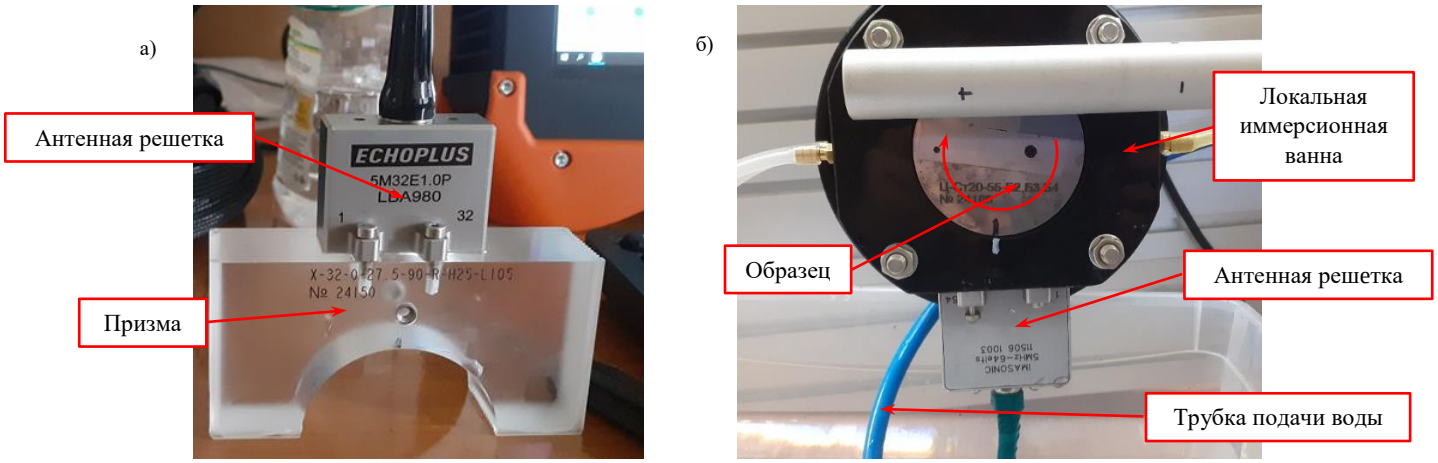


Рис. 2. Антенная решётка на призме специальной конструкции (а), измерения с локальной иммерсионной ванной (б)

Так как происходит сравнение амплитуд ЦФА-изображений, полученных антенными решетками на разных частотах, то необходимо выровнять их чувствительность. Попытка сделать это с использованием амплитуд донного импульса или амплитуд индикации дна на ЦФА-изображении с учетом площадей элементов антенной решетки не увенчалась успехом. Для выравнивания чувствительности весовые коэффициенты для изображения на каждой частоте подбирались так, чтобы восстановленная карта номеров зерна образца совпадала с известной. Далее при всех измерениях этими тремя антенными решетками использовались подобранные коэффициенты.

На Рис. За представлена восстановленная карта номеров зерна образца № 15, который можно признать годным для дальнейшей работы, так как номер зерна больше 6. Цветовая шкала справа от карты номера зерна отградуирована от -3 до 10 баллов. На Рис. 3б показана карта номера зерна образца №31, на которой видны области с номером зерна 3 и 4. Более того, на карте имеется небольшая область, в которой номер зерна оценен как 0. К сожалению, число точек, в кото-

рых оценивался номер зерна при металлографических исследованиях, было невелико и их координаты были не известны, что не позволило сопоставить результаты металлографических исследований с построенной картой номера зерна по всему сечению образца.

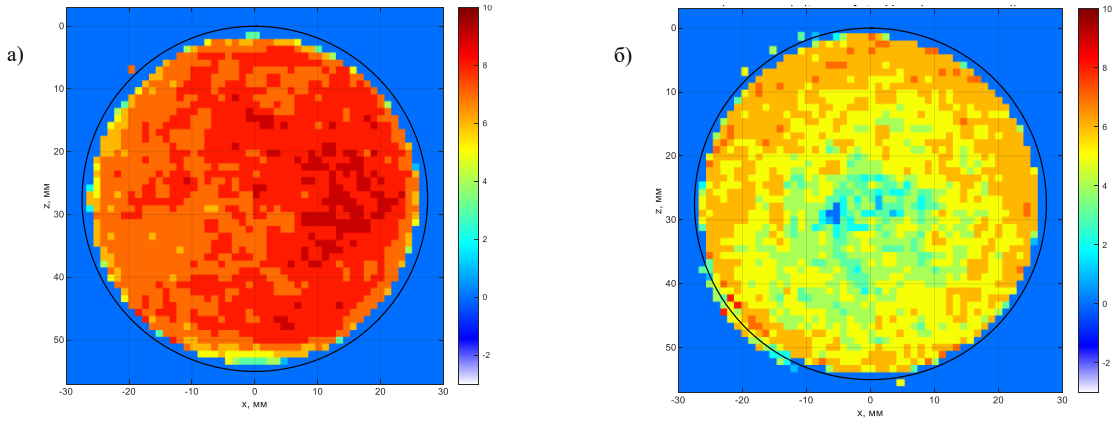


Рис. 3. Карта номера зерна: заготовки № 15 годной для дальнейшей обработке (а), забракованной заготовки № 31 (б)

Заключение

На основе теории Роуза предложен метод построения карты номера зерна в сечении прутков по изображениям, восстановленным по эхосигналам, измеренным тремя антенными решетками с рабочими частотами 2.25, 5 и 10 МГц.

Модельные эксперименты с прутками диаметром 55 мм показали корреляцию восстановленной карты номера зерна, полученной с помощью предлагаемого метода, с результатами металлографических исследований. Однако, объем сравнительных опытов в настоящее время недостаточно велик и поэтому требуются дополнительные измерения.

Список литературы

1. ГОСТ Р 53205–2008. Контроль неразрушающий. Определение размеров зерен стали акустическим методом. Общие требования» (издание официальное, Москва: Стандартинформ, 2009.

2. Holmes C., Drinkwater B.W., Wilcox, P.D. Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for non-destructive evaluation. // NDT&E International. 2005. Vol. 38. p. 701-711.

3. Бадалян В.Г., Базулин А.Е., Базулин Е.Г., Вопилкин А.Х., Тихонов Д.С. Неразрушающий контроль. Ультразвуковые методы. Цифровые когерентные технологии. Дефектометрия М.: Издательский дом «Спектр», 2025. – 640 с.: ил. ISBN 978-5-4442-0200-5

4. Данилов В.Н., Ушаков В.М. Оценка средних размеров зерен в металле и их разброса по измерению амплитуды донных сигналов продольных волн с различным числом отражений // Контроль. Диагностика. 2024. №8. С. 4-16. DOI: 10.14489/td.2024.08.pp.004-016.

5. Rose J. Ultrasonic backscattering from polycrystalline aggregates using time-domain linear response theory. In D.O. Thompson & D. E. Chimenti. (Eds). Review of Progress in Quantitative NDE. New York: Plen, 1991. V 10. P. 1715-1720.

6. A. Van Pamel, C. R. Brett, P. Huthwaite, M. J. Lowe, «Finite element modelling of elastic wave scattering within a polycrystalline material in two and three dimensions», Journal of the Acoustical Society of America, vol. 138, no. 4, p. 2326, 2015. https://doi.org/10.1121/1.4931445

7. Официальный сайт фирмы НПЦ «ЭХО+». — Текст: электронный // ЭХО+. — [Б.м.], [б.и.], [б.г.]. — URL: https://echoplus.ru/ (дата обращения: 01.04.2026).

УДК: 539.3 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39488

Селективное возбуждение бегущих упругих волн системой полосовых пьезоактуаторов

Е.В. Глушков[1,a], Н.В. Глушкова[1,b], Д.Д. Халтурина[1,c]

[1] Институт математики, механики и информатики, Кубанский государственный университет. Россия, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149

E-mail: [a]evg@math.kubsu.ru, [b]nvg@math.kubsu.ru, [c]khalturina@kubsu.ru

Аннотация: Разработан алгоритм определения управляющих электрических сигналов, подаваемых на систему полосовых пьезоактуаторов, прикрепленных к поверхности упругого слоистого волновода, которые обеспечивают селективное возбуждение требуемых мод бегущих волн. Ключевыми этапами алгоритма являются 1) использование экспериментально верифицированных интегральных и асимптотических представлений для суммарного волнового поля и отдельных бегущих волн, генерируемых пьезоэлементами, через элементы матрицы Грина слоистой структуры 2) решение базисного набора связных динамических контактных задач, определяющее взаимное влияние элементов системы, 3) формирование на этой основе матрицы целевой функции и 4) сведение задачи оптимизации к нелинейному матричному уравнению и получение требуемого набора управляющих параметров через решение соответствующей задачи на собственные значения. Алгоритм иллюстрируется численными примерами, показывающими возможность полного подавления нежелательных волн Лэмба.

Ключевые слова: упругий слоистый волновод, пьезоэлектрические актуаторы, динамическая контактная задача, матрица Грина, оптимальные управляющие сигналы.

Selective elastic guided wave excitation by a system of strip piezoelectric patches

E.V. Glushkov[1,a], N.V. Glushkova[1,b], D.D. Khalturina[1,c]

[1] Institute for Mathematics, Mechanics and Informatics, Kuban State University. Russia, Krasnodar, Stavropolskaya st., 149

E-mail: [a]evg@math.kubsu.ru, [b]nvg@math.kubsu.ru, [c]khalturina@kubsu.ru

Abstract: An algorithm has been developed to determine the control electrical signals that are supplied to a system of piezoelectric actuators that are attached to the surface of an elastic layered waveguide. These signals are used to selectively excite the desired traveling wave modes. The key steps of the algorithm include 1) using experimentally verified integral and asymptotic

representations of the total wave field and the individual traveling waves generated by the piezoelectric elements through the use of the elements of the Green's matrix for the layered structure; 2) solving a basis set of coupled dynamic contact problems to determine the mutual influence between the system elements; 3) forming an objective function matrix based on these solutions; 4) reducing the optimization problem to a nonlinear matrix equation and solving the corresponding eigenvalue problem to obtain the required set of control parameters.. The algorithm is demonstrated with numerical examples that show the possibility of completely eliminating unwanted Lamb waves.

Keywords: layered elastic waveguide, piezoelectric patches, dynamic contact problem, Green’s matrix, optimal driving signals

PACS: 43.20.Bi, 43.35.Pt, 77.65.−j

Введение

Необходимость моделирования распространения бегущих волн, возбуждаемых системой пьезоэлементов в упругом материале, возникает при решении задач ультразвукового неразрушающего контроля, активного гашения вибрации и ультразвукового прецизионного позиционирования. Идея селективного возбуждения бегущих волн заключается в том, чтобы при помощи выбора режима подачи управляющих электрических напряжений на систему пьезонакладок, прикрепленных к упругому слою, обеспечить возбуждение требуемых бегущих волн и подавление нежелательных волн-помех. Традиционно для моделирования волновых полей используются упрощенные модели теории тонких пластин и приближенная аппроксимация контактных напряжений. Однако они не описывают взаимное влияние пьезоэлементов, а при определении управляющих параметров недостаточно использовать представление волнового поля, возбуждаемого каждым пьезоэлементом по-отдельности.

Учет их взаимного влияния через упругую подложку обеспечивается строгим решением соответствующей динамической контактной задачи для системы накладок, деформация которых описывается обобщенным законом Гука со связным электрическим полем. Для достижения этой цели разработан и реализован алгоритм, базирующийся на решении интегро-дифференциальных уравнений связной контактной задачи о динамическом взаимодействии системы пьезоактуаторов со слоистой упругой подложкой. Ключевым этапом данного метода, отличающим его от других известных подходов, является определение управляющих электрических сигналов, подаваемых на каждый пьезоэлемент, через собственные решения задачи оптимизации, сформулированной из набора базисных решений контактной задачи. Характеристики возбуждаемых волн определяются с помощью полуаналитических представлений через элементы матрицы Грина слоистой структуры.

Приводятся численные примеры, иллюстрирующие подавление ненужных мод для возбуждения одномодового сигнала в выбранном направлении.

2 Система интегро-дифференциальных уравнений

В плоской постановке рассматривается связная контактная задача о взаимодействии системы M тонких гибких пьезонакладок с упругим слоем толщины h. Накладки контактируют с поверхностью слоя в областях Ω_m: $|x - x_m| < a_m$, $m = 1, 2, \ldots, M$ (рис. 1). Установившиеся гармонические колебания слоя $\mathbf{u}(x,z)e^{-i\omega t}$ генерируются касательными контактными напряжениями $\tau_{xz,m} = q_m(x)e^{-i\omega t}$, возникающими при продольной деформации пьезоэлементов $\varepsilon_{x,m} = v_m'(x)e^{-i\omega t}$ под действием подаваемого на них электрического напряжения $V_m e^{-i\omega t}$. Гармонический множитель $e^{-i\omega t}$ в дальнейшем опущен.

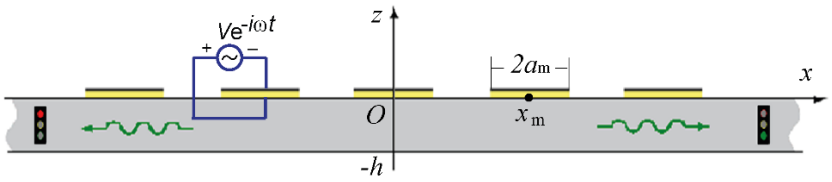


Рис. 1. Геометрия задачи

Вектор комплексной амплитуды смещений $\mathbf{u} = (u_x, u_z)$ удовлетворяет уравнениям Ламе, а для продольных смещений накладок $v_m(x) = u_x(x,0)$ выводятся обыкновенные дифференциальные уравнения. Подробное описание постановки задачи, а также используемых обозначений, допущений и интегральных и асимптотических представлений волновых полей приводится в работах [1,2] и цитируемых в них статьях.

В вариационной постановке задача сводится к системе интегро-дифференциальных уравнений относительно неизвестных контактных напряжений q_m и смещений v_m:

$$\mathrm{K}q_m \equiv (2\pi)^{-1}\int_\Gamma \mathbf{K}_1(\alpha,z)Q_m(\alpha)e^{-i\alpha x}d\alpha = v_m, \quad x \in \Omega_m, \quad z = 0, \tag{1}$$

$$\mathrm{M}_m v_m \equiv v_m'' + \kappa_m^2 v_m = b_m q_m, \quad x \in \Omega_m \tag{2}$$

$$v_m'|_{x=\pm a_m} = e_m, \quad m = 1,2,\ldots,M \tag{3}$$

Интегральный оператор $\mathrm{K}q$ выражается через первый столбец $\mathbf{K}_1$ Фурье-символа матрицы Грина $K = [\mathbf{K}_1{:}\mathbf{K}_2]$ упругой подложки и Фурье-образ контактных напряжений $Q = \mathrm{F}_x[q]$; F_x – оператор преобразования Фурье по x. Константы κ_m и b_m выражаются через параметры пьезоматериала и толщину накладок, а e_m – через вольтаж V_m управляющих сигналов (см. [1,2]). Требуется определить набор управляющих параметров $\mathbf{e} = (e_1, e_2, \ldots e_M)$, обеспечивающий максимизацию и/или подавление энергии выбранных мод бегущих волн, возбуждаемых набором контактных напряжений $q = (q_1, q_2, \ldots q_M)$.

2 Селективное возбуждение нормальных мод

Применение теории вычетов к контурным интегралам оператора Kq позволяет получить явное представление бегущих волн $\mathbf{u}_n^{\pm}$, возбуждаемых поверхностной нагрузкой $q(x)$ и распространяющихся по упругому волноводу вправо и влево от накладок (верхний и нижний знак, соответственно):

$$\mathbf{u}(x,z)=\sum_{n=1}^{N_r}\mathbf{u}_n^{\pm}(x,z)=\sum_{n=1}^{N_r}t_n^{\pm}\mathbf{a}_n^{\pm}(z)e^{\pm i\zeta_n x}+O(e^{-\mathrm{Im}\,\zeta_{N_r+1}|x|}),\quad |x|>\dim\Omega \tag{4}$$

Здесь $t_n^{\pm}=ir_nQ(\mp\zeta_n)$, ζ_n – полюса элементов вектора $\mathbf{K}_1$, $r_n=\mathrm{res}K_{11}(\alpha,0)|_{\alpha=\zeta_n}$, а $\mathbf{a}_n^{\pm}(z)=\mathbf{K}_1(\alpha,z)/\mathrm{K}_{11}(\alpha,0)|_{\alpha=\mp\zeta_n}$ – собственные формы бегущих волн, нормированные на значения их первых компонент при z = 0, N_r – число вещественных полюсов. В представлении (4) полюса ζ_n играют роль волновых чисел бегущих волн $\mathbf{u}_n^{\pm}$; при $n > N_\mathrm{r}$ комплексные ζ_n дают волны, амплитуда которых экспоненциально убывает с удалением от источника. Зависимость ζ_n от частоты определяет дисперсионные свойства нормальных мод $\mathbf{u}_n^{\pm}$ в рассматриваемом упругом волноводе-подложке. В качестве иллюстрации, на рис. 2 показана типичная картина вещественных дисперсионных кривых для антисимметричных и симметричных волн Лэмба $\mathrm{A_n}$ и $\mathrm{S_n}$ в однородном изотропном упругом слое с коэффициентом Пуассона 0.3.

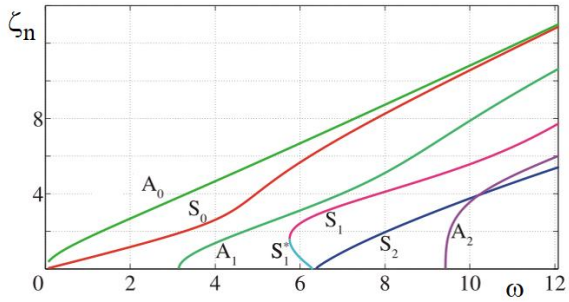


Рис. 2. Дисперсионные кривые

Здесь и далее численные результаты приводятся в безразмерном виде в единицах, выраженных через толщину слоя h (для линейных размеров), скорость поперечных волн c_S и плотность ρ; безразмерная круговая частота $\omega=2\pi fh/c_\mathrm{S}$, где f – размерная частота в герцах.

Для определения неизвестных коэффициентов $t_n^{\pm}$ в разложении (4) необходимо решить связную контактную задачу (1) – (3), дающую $Q(\alpha)=\mathrm{F}_x[q]$. Ее решение можно получить разными способами, например, методом коллокаций или Галеркина, раскладывая неизвестные $q(x)$ и $v(x)$ по системе заданных базисных функций, или используя коммерческие пакеты, реализующий метод конечных элементов (МКЭ). Однако

предварительно должен быть задан набор управляющих параметров **e**, которые неизвестны, поэтому строится базисная система решений $q^{(j)}$ для задач вида (1) – (3), но с заданными $e_m = \delta_{mj}$, где δ_{mj} – символы Кронекера (в качестве e_m по очереди берется единица, а остальные нули). Требуемое решение является линейной комбинацией этих базисных решений: $q = \sum_j e_j q^{(j)}$, а осредненная за период колебаний волновая энергия $E_n^{\pm} = \omega r_n \left| Q(\mp\zeta_n \right|^2$, переносимая каждой модой $\mathbf{u}_n^{\pm}$ через поперечное сечение волновода право и влево от источника, представима в виде квадратичной формы относительно вектора **e:**

$$E_n^{\pm} = \frac{\omega r_n}{4}\left(\sum_{i=1}^{M} e_i Q^{(i)}\left(\mp\zeta_n\right)\right)\left(\sum_{j=1}^{M} e_j Q^{(j)}\left(\mp\zeta_n\right)\right)^{*} = \left(B_n^{\pm}\mathbf{e},\mathbf{e}\right) \tag{5}$$

с эрмитовой матрицей $B_n^{\pm} = \left[b_{n,ij}^{\pm}\right]_{ij=1}^{M}$, $b_{n,ij}^{\pm} = \omega r_n Q^{(i)}\left(\mp\zeta_n\right)\left(Q^{(j)}\left(\mp\zeta_n\right)\right)^{*}/4$; звездочкой обозначена операция комплексного сопряжения.

Представление (5) позволяет сформировать целевую функцию $g(\mathbf{e}) = (B\mathbf{e},\mathbf{e})/(\mathbf{e},\mathbf{e})$ для задачи максимизации или минимизации энергии требуемых мод, которая достигается в точках ее экстремума, удовлетворяющих условию $\partial g / \partial e_j = 0$ для всех j = 1, …, M. Матрица B формируется как сумма N матриц $B_n^{\pm}$ ($N \le 2N_r$) с номерами n тех мод, которые выбраны для селективного возбуждения или подавления. Условия экстремума приводят к однородной нелинейной матричной задаче:

$$\partial g / \partial e_j = 0 \;\Rightarrow\; [B - g(\mathbf{e})I]\mathbf{e} = 0, \tag{6}$$

собственные решения которой $\mathbf{e}_k$ дают локальные экстремумы целевой функции; I – единичная матрица. Несложно убедиться, что $\mathbf{e}_k$ совпадают с собственными векторами матрицы B: $B\mathbf{e}_k = \lambda_k\mathbf{e}_k$, а значение целевой функции в этих точках совпадает с соответствующими собственными числами этой матрицы: $g(\mathbf{e}_k) = \lambda_k\mathbf{e}_k$. Таким образом, максимизация или минимизация целевой функции достигается выбором вектора $\mathbf{e}_k$, соответствующего собственному значению $\lambda = \max\lambda_k$ или $\lambda = \min\lambda_k$.

Следует отметить, что матрица B формируется из скалярных произведений N векторов $\mathbf{Q}_n^{\pm} = (Q_n^{(1)},...,Q_n^{(M)})$ длины M; здесь $Q_n^m = Q^{(m)}\left(\mp\zeta_n\right)$, то есть это матрица Грамма, определитель которой равен нулю при $N < M$. В этом случае ее минимальное собственное значение $\lambda_{\min} = 0$. Отсюда вытекает правило: для теоретически полного подавления N мод достаточно использовать $M > N$ пьезонакладок, а в качестве набора управляющих параметров **e** выбрать собственный вектор $\mathbf{e}_k$, соответствующий нулевому собственному значению. Проиллюстрируем это правило на численных примерах.

3 Численные примеры

На рис. 3 приводится серия графиков смещения поверхности слева и справа от источников, иллюстрирующая постепенное подавление всех четырех фундаментальных мод A_0 и S_0 (по две слева и справа) в двухмодовом диапазоне (ω = 2, рис. 2). Подавление каждой следующей моды происходит за счет увеличения числа пьезоэлементов M от 2 до 5. Два элемента оказывается достаточно для подавления одной из мод (верхний ряд графиков), а полное подавление всех четырех бегущих волн достигается при использовании пяти источников (нижние графики).

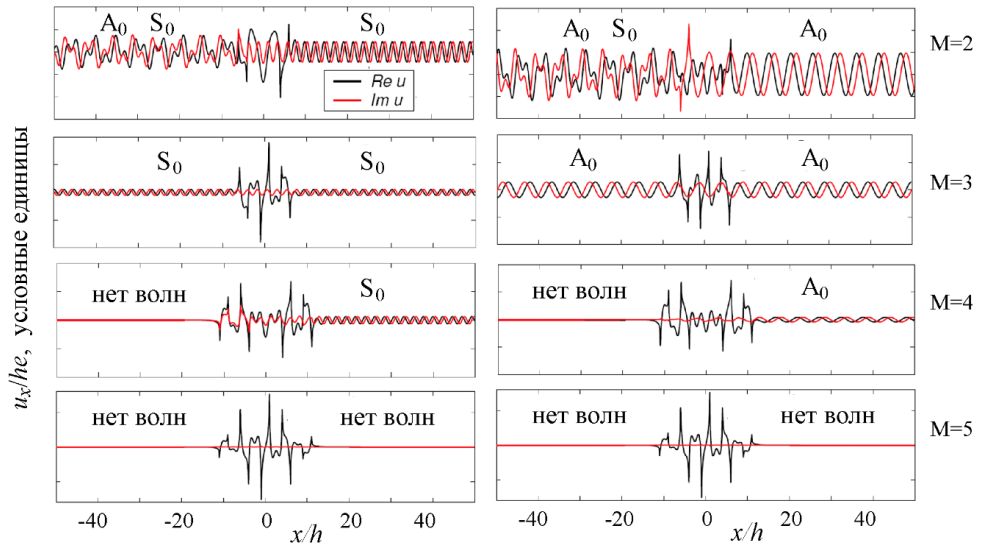


Рис. 3. Графики вещественной и мнимой части касательной компоненты комплексной амплитуды смещений поверхности $\mathbf{u}(x,0)$, рассчитанные по формуле (4), используя коэффициенты $t_n^{\pm}$, полученные из условия полного подавления N=M-1 мод при числе пьезоэлементов M от 2 до 5; безразмерная частота ω = 2 (см. рис. 2). В левой колонке графиков в первую очередь подавляется мода A_0, а в правой – S_0.

Заключение

Поскольку ключевое для разработанного алгоритма представление (4) справедливо не только для классических волн Лэмба, возбуждаемых в однородном упругом слое, но и для многослойных, анизотропных и функционально-градиентных упругих волноводов, параметры селективного возбуждения бегущих волн в таких волноводах рассчитываются по той же схеме. Отличие только в конкретном виде матрицы Грина K, алгоритм расчета которой разработан, реализован и апробирован и для случая таких сред.

Работа выполняется в рамках проекта РНФ № 24-11-00140.

Список литературы

1. *Глушков Е.В., Глушкова Н.В., Зеемann В., Кваша О.В.* Возбуждение упругих волн в слое пьезокерамическими накладками // Акустический журнал. 2006. **52**, № 4. С. 470.
2. *Glushkov E., Glushkova N., Kvasha O., Seemann W.* Integral equation based modeling of the interaction between piezoelectric patch actuators and an elastic substrate // Smart Materials and Structures. 2007. **16**. P. 650.

УДК: 534-8, 534.08 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39489

Формирование импульсного эхосигнала при дефокусировании сферического излучателя акустического микроскопа

Левин В.М.[1)], Петронюк Ю.С.[1,2)]

[1)] Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт биохимической физики имени Н.М. Эмануэля Российской академии наук, Москва

[2)] Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук, Москва

Тел.: 499 1378347; E-mail: jps7@mail.com

В работе исследуется формирование выходного сигнала акустического микроскопа при отражении от плоской границы. Показано, что в формировании отражённого сигнала участвуют параксиальная и краевая части фокусированного ультразвукового пучка. Расчёты свидетельствуют о том, что результат интерференции этих компонентов критически зависит от положения фокуса относительно отражающей плоскости. Установлено, что различие во временны́х задержках импульсов определяется направлением и величиной смещения фокусирующей системы, а также угловой апертурой излучателя. Указанное различие незначительно при смещении фокуса в сторону образца и существенно возрастает при движении в противоположном направлении. Наблюдаются две возможные формы выходного сигнала: а) суперпозиция двух сигналов интегральной формы, возникающая при значительной разности хода центральных и краевых лучей; б) одиночный импульс, совпадающий по форме с исходным зондирующим сигналом, — при минимальной разности хода. Экспериментальное наблюдение описанных особенностей формирования эхо-сигнала выполнялось на акустическом микроскопе с рабочей частотой 50 МГц с использованием техники $V(z,t)$.

Ключевые слова: акустическая микроскопия, $V(z,t)$ метод, фокусированный ультразвук

PACS: 43.20.Fn, 43.35.Yb

Введение

Теоретическое описание отражения сфокусированного акустического пучка от плоской пластинки служит основой для интерпретации акустических изображений и количественных измерений в акустической микроскопии. Выходной сигнал микроскопа формируется как суперпозиция волн, отражённых от поверхности образца, и включает три

компонента: зеркально отражённое излучение (с разделением на параксиальную и краевую части), а также вклад вытекающих поверхностных мод. Процесс формирования сигнала от поверхности неоднократно исследовался, однако в подавляющем большинстве работ учитывался вклад лишь параксиальных лучей и вытекающих рэлеевских волн [1–2]. Вопрос о роли краевых компонентов зондирующего пучка остается открытым. При объёмной визуализации в импульсном режиме эхо-сигнал от поверхности обычно используется в качестве референсного — для определения временных задержек эхо-сигналов, возникающих внутри образца. В импульсном режиме при смещении фокусирующей системы из фокальной плоскости вклады поверхностных волн, центральной и краевой частей пучка могут разделяться по времени задержки. Это открывает возможность для проведения акустических измерений: определения положения отражателей, оценки скорости звука и других акустических параметров. В настоящей работе в рамках лучевого приближения мы теоретически рассмотрели участие краевых компонентов пучка в формирование импульсного отклика от плоской отражающей поверхности и провели соответствующее экспериментальное исследование.

Теоретический анализ и экспериментальные результаты

Зондирующий сигнал импульсного акустического микроскопа представляется в виде непрерывного набора гармонических компонент, генерируемых сферическим излучателем в иммерсионной жидкости и падающих на плоскую поверхность твердотельного объекта. После отражения от границы раздела «иммерсия-образец» каждая компонента дает излучение с той же частотой ω, и это регистрируется фокусирующей системой в виде выходного сигнала $V(t) = \int V_\omega e^{-i\omega t} d\omega$, где V_ω – гармонические компоненты сигнала.

В фокусирующей системе падающее излучение имеет сферический волновой фронт внутри угловой апертуры $2\theta_m$. В своих расчетах мы рассматриваем излучаемую волну как пучок лучей внутри апертуры $2\theta_m$. Взаимодействие такого пучка с плоской границей схематически показано на рис. 1. В данном рассмотрении мы ограничиваемся зеркальным отражением от плоской границы, не уделяя внимания вытекающим поверхностным волнам, вклад которых в выходной сигнал сферического излучателя неоднократно исследовался [1], в т.ч. в лучевом приближении [2] и для коротких негармонических сигналов [3]. Будем предполагать, что угловая апертура зондирующего пучка достаточно мала: $\sin\theta_m \approx \theta_m$.

Величина выходного сигнала V_ω определяется электрическим зарядом Q_ω, возникающим на электродах пьезопреобразователя (ПП). Разность потенциалов на электродах пропорциональна поверхностной плотности заряда, индуцированной

падающим ультразвуком. Заряд Q_ω возникает только в пределах зоны, освещаемой отраженным пучком, но распределяется по всей площади электродов S. Таким образом, выходной сигнал можно записать как: $V_\omega = A' \cdot Q_\omega / S$, где A' – коэффициент, определяемый свойствами ПП. Прием излучения, отраженного от границы раздела, происходит из жидкости, и действующим фактором для пьезоэффекта является локальное давление p_ω, направленное по нормали к поверхности ПП. Полный заряд на его электродах определяется интегральным образом: $Q_\omega = A \iint_S p_\omega(\vec{r})ds$, где $p_\omega(\vec{r})$ - давление в текущей точке $\vec{r}$ на поверхности преобразователя площадью S, A – константа, включающая все особенности приема переменного давления, в т. ч. константу электромеханической связи пьезоэлектрика. При интегрировании значимой оказывается только та часть площади S, которая освещается падающим пучком (рис. 1).

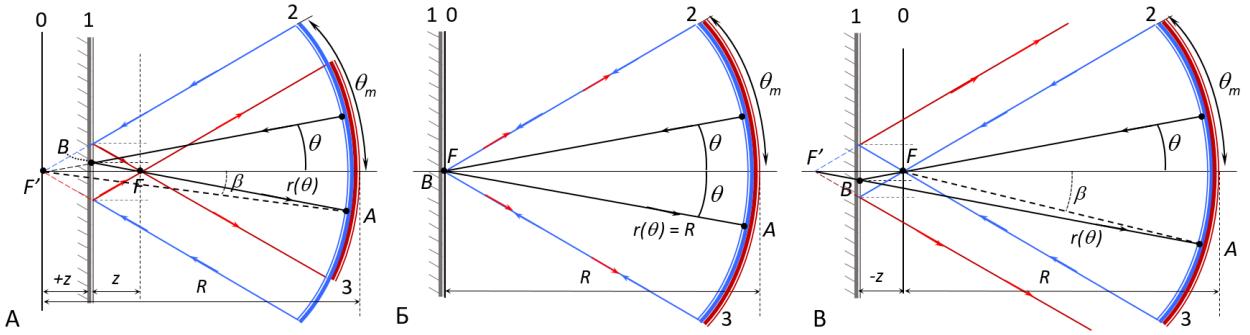


Рисунок 1. Взаимодействие фокусированного пучка с границей раздела: *А* – смещение фокуса вглубь образца ($z > 0$), *Б* – фокус на границе раздела ($z = 0$), *В* – смещение от образца в иммерсию ($z < 0$). Здесь 0 – фокальная плоскость, 1 – граница раздела, 2 –поверхность излучателя, 3 – принимающая поверхность, R – радиус кривизны излучателя, θ_m – угловая апертура излучателя, F – действительный фокус, F' – мнимый фокус, z – смещение из фокального положения ($z = 0$), A – точка прихода луча, излученного под углом θ, B – точка отражения луча, падающего под углом θ, $r(\theta)$ – путь падающего под углом θ луча от точки фокуса F до текущего положения сферического фронта, β – угол прихода луча в точку A из геометрического центра сферической поверхности.

Поле падающего излучения выражается в виде сферической волны давления $p_\omega(\vec{r})$, распространяющейся от излучателя и сходящейся в его геометрическом центре (рис. 1, “0”):

$$p_\omega(\vec{r}, t) = p_{0\omega} \cdot \frac{R}{r} \cdot e^{-ikr - i\omega t}; \quad (1)$$

здесь $p_{0\omega}$ – давление, создаваемое в жидкости сферическим сегментом непосредственно вблизи его колеблющейся границы, r – расстояние от точки фокуса зондирующего пучка F до текущей точки наблюдения A (рис. 1). Результат взаимодействия этой волны с отражающей границей и, соответственно, результат расчета выходного сигнала сферического преобразователя в режиме на прием, зависит от положения фокуса зондирующего пучка. Рассмотрим зависимость $p_\omega(\vec{r}, t)$ от смещения фокуса z относительно границы раздела.

В случае $z = 0$ фокус совпадает с границей раздела (рис. 1Б). Выходной сигнал $V(z,t)$ для фокальной позиции совпадает по форме с зондирующим сигналом:

$$P(t) = \int_{-\infty}^{\infty} p_{0\omega} \cdot e^{-i\omega t}\, d\omega \quad (2)$$

и оказывается задержанным на время его распространения (туда-обратно до отражающей передней поверхности образца):

$$V(z=0,t) = A\int_{-\infty}^{\infty} p_{0\omega} \cdot e^{2ikR-i\omega t}\, d\omega = A \cdot P(t - 2R/c) \quad (3)$$

В случае $z > 0$ фокус смещается за границу раздела вглубь образца (рис. 1А). Выходной сигнал $V(z,t)$ оказывается суперпозицией сигналов, создаваемых центральной частью зондирующего пучка и конусом краевых лучей, распространяющихся под углом θ_m:

$$V(z>0,t) = A \cdot \frac{c}{z} \cdot \frac{1}{\theta_m^2}\{P_1(t - L_0/c) - P_1(t - L_m/c)\}, \quad (4)$$

где L_0 и L_m – расстояния, проходимые центральным и краевым лучами зондирующего пучка, соответственно, от точек их излучения до точек приема на поверхности ПП:

$$L_0 = 2(R - z); \quad (5)$$

$$L_m = 2(R - z) + \frac{(R-2z)\cdot z}{R} \cdot \theta_m^2 \quad (6)$$

В отличие от случая $z = 0$ парциальные эхо-сигналы входят в регистрируемый сигнал в интегральной форме зондирующего сигнала $P(t)$:

$$P_1(t) = \int_{-\infty}^{\infty} [p_{0\omega}/(-i\omega)] \cdot e^{-i\omega t}\, d\omega = \int_{-\infty}^{t} P(\tau) d\tau \quad (7)$$

В случае $z < 0$ фокус находится перед образцом на расстоянии $|z|$ (рис. 1В). Выходной сигнал $V(z,t)$, как и в предыдущем случае, оказывается суперпозицией сигналов, создаваемых центральной частью пучка и конусом краевых лучей:

$$V(z<0,t) = A \cdot \frac{c}{|z|} \cdot \frac{1}{\theta_m^2}\{P_1(t - L'_m/c) - P_1(t - L'_0/c)\}, \quad (8)$$

где L'_0 и L'_m – пути пробега от точки излучения до точки приема на поверхности сферического преобразователя для центрального и краевого лучей в измененной геометрии:

$$L'_0 = 2(R + |z|); \quad (9)$$

$$L'_m = 2(R + |z|) - \frac{R\cdot|z|}{(R+2|z|)} \cdot \theta_m^2 \quad (10)$$

Таким образом, выходной сигнал фокусирующей системы оказывается суперпозицией вкладов центрального и краевых лучей, приходящих на сферический преобразователь вне зависимости от знака z. При этом в зависимости от направления смещения фокуса в качестве краевых выступают различные компоненты первоначального пучка (рис. 1). При сдвиге фокуса в объем образца краевыми оказываются лучи,

ограничивающие апертуру первоначального пучка и идущие под углом θ_m (Рис. 1а). При удалении фокуса от образца в иммерсионную жидкость конус краевых лучей первоначального пучка не попадает в угловую апертуру сферического ПП (Рис. 1в). Роль краевых принимает на себя конус внутренних лучей пучка, падающий под все меньшим углом по мере удаления фокуса от отражающей поверхности. Путь, проходимый центральным лучом от точки излучения до его приема после отражения, описывается единой формулой $L_0(z) = 2(R - z)$, которая дает формулы (5) и (9) в зависимости от знака z. В то же время пути L_m и L'_m, проходимые краевыми лучами, для разных направлений смещения описываются разной зависимостью.

В зависимости от направления смещения меняется порядок прихода составляющих сигналов. Согласно выражениям (5) и (6) при $z > 0$ длина пути краевых лучей превосходит длину пути центрального луча на величину

$$\Delta L = L_m - L_0 = \frac{z\cdot(R-2z)}{R}\theta_m^2 \qquad (10)$$

Первым приходит сигнал от параксиальных лучей, а сигнал краевых лучей запаздывает на время $\Delta t = \Delta L/c$. При $z < 0$ длина пути центрального луча оказывается больше длины пути краевых лучей:

$$\Delta L' = L'_m - L'_0 = \frac{|z|\cdot R}{R+2|z|}\theta_m^2 \qquad (11)$$

В этой конфигурации первыми приходят краевые лучи, и затем, с запозданием $\Delta' t = \Delta L'/c$ приходят параксиальные.

Оба выражения для выходного сигнала (4) и (8) включают множитель $1/|z|$, расходящийся при малых $|z| \to 0$, что требует особого рассмотрения. В этом случае разность сигналов $P_1(t)$, стоящая в числителе, также стремиться к нулю, т.к. $L_m \to L_0$ и $L'_m \to L'_0$. Разность сигналов можно записать в виде:

$$P_1(t - L_0/c) - P_1(t - L_m/c) \approx$$
$$P_1(t - L_0/c) - \left\{P_1(t - L_0/c) - \frac{\Delta L}{c}\cdot\frac{dP_1(t-L_0/c)}{dt}\right\} \approx P(t - L_0/c)\cdot\frac{z}{c}\theta_m^2 \qquad (12)$$

Подставляя этот результат в выражение (4) или (8), получаем выходной сигнал в окрестности фокальной позиции в виде:

$$V(z,t) = A\cdot P(t - 2\,(R - z)/c)\,, \qquad (13)$$

вне зависимости от знака z. При $z = 0$ выражение (13) совпадает с выходным сигналом в фокальной позиции, рассчитанным нами ранее (3).

Теоретические оценки показывают, что при дефокусировании наблюдаются две возможные формы выходного сигнала фокусирующей системы: (а) в виде суперпозиции двух сигналов интегральной формы $P_1(t)$ при значительной разнице ΔL в пути

центральных и краевых лучей, (б) в виде единственного импульса, совпадающего по форме с первоначальным зондирующим сигналом $P(t)$ при минимальном $\Delta L \ll L_0$. Последнее выполняется при смещении фокуса в объем образца ($z > 0$) для излучателей с различной угловой апертурой в широком интервале смещений вплоть до положения, при котором излучатель почти соприкасается с отражающей поверхностью. На рис. 2 показана экспериментальная эволюция выходного эхо-импульсного сигнала $V(z,t)$ акустического микроскопа при смещении объектива из фокального положения (точка Б). Структура выходного сигнала оказывается асимметричной относительно знака смещения.

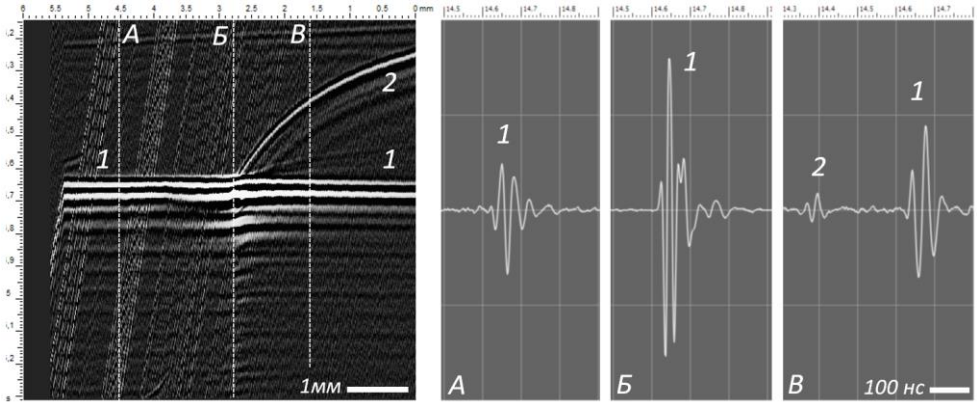


Рисунок 2. Экспериментальное наблюдение эволюции сфокусированного эхоимпульса от плоской границы «вода-алмаз»: *А* – $z > 0$; *Б* – $z = 0$; *В* – $z < 0$; 1 – сигнал от параксиальных лучей, 2 – сигнал от краевых лучей. Слева развертка $V(z,t)$ сигнала, f = 50 МГц, θ_m = 30 градусов.

При смещении вглубь образца (рис. 2, точка А) сигнал сохраняет свою форму $P(t)$, т.к. разница во времени задержки краевых и центральных лучей минимальна. В данном случае при использовании линзы частотой 50 МГц с угловой апертурой 30° и фокальным расстоянием 3.68 мм, эта разница ΔL = 32 мкм, Δt = 20 нс, что сравнимо с длительностью импульса и периодом зондирующих колебаний. В случае смещения в сторону иммерсии (рис. 2, точка В) импульсы от края и центра разделились и изменили свою форму на интегральную $P_1(t)$.

Исследования выполнены в рамках государственного задания №122041400112-8 и FFNS-2027-0008.

Список литературы

1. *Briggs A., Kolosov O.V.,* Acoustic Microscopy. Oxford University Press. 2010.
2. *Parmon W., Bertoni H.L.* Ray interpretation of the material signature in the acoustic microscope // Electr. Lett., **15**(21). 1979. P. 684-686.
3. *Xiang D., Hsu N. N., and Blessing G. V.* The design, construction and application of a large aperture lens–less line–focus PVDF transducer // Ultrason. **34**(6). 1996. P. 641–647.

УДК: 534.222; 551.463 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39490

Взаимосвязь рассеяния, поглощения, скорости звука и параметра нелинейности жидкости с пузырьками

В.А. Буланов[1,a] , Е.В. Соседко[1,b]

[1]Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН

690041, Владивосток, ул. Балтийская. 43

E-mail: [a]bulanov@poi.dvo.ru, [b]s_kat@mail.ru

Аннотация: Аномалии в акустических свойствах реальной жидкости часто связаны с существованием в жидкости газовых или паро-газовых пузырьков. Установлена взаимосвязь коэффициентов рассеяния, поглощения и скорости звука с параметром акустической нелинейности жидкости при типичных распределениях пузырьков в морской воде. Обсуждены эффекты нестационарного рассеяния звука, которые возникают вследствие переходных процессов раскачки пузырьков при внешнем акустическом воздействии. Применение рассеяния и распространения звука с учетом нелинейных свойств жидкости с пузырьками позволяет проводить спектроскопию пузырьков в жидкости. Высокая эффективность рассеяния звука в пузырьковых структурах в жидкости связана с резонансным характером рассеяния звука на пузырьках. Показано соответствие между теоретическими и экспериментальными результатами. Работа выполнена в рамках госзадания по темам FWMM-2024-0015, рег. №124022100075-6 и FWMM-2024-0014, рег. №124022100072-5.

Ключевые слова: нелинейность, поглощение, рассеяние звука, пузырьки

THE RELATIONSHIP OF SOUND SCATTERING, ABSORPTION, SPEED OF SOUND AND NONLINEARITY PARAMETER OF THE LIQUID WITH BUBBLES

V.A. Bulanov[1,a] , E.V. Sosedko[1,b]

[1]V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of FEB RAS,

690041, Vladivostok, 43, Baltiskaya St. Russia

E-mail: [a]bulanov@poi.dvo.ru, [b]s_kat@mail.ru

Abstract: Anomalies in the acoustic properties of a real liquid are often associated with the existence of gas or vapor-gas bubbles in the liquid. The relationship between the coefficients

of scattering, absorption, and sound velocity and the parameter of acoustic nonlinearity of the liquid has been established for typical distributions of bubbles in seawater. The effects of non-stationary sound scattering, which occur due to the transient processes of bubble excitation under external acoustic influence, have been discussed. The application of sound scattering and propagation, taking into account the nonlinear properties of a liquid with bubbles, allows for the spectroscopy of bubbles in the liquid. The high efficiency of sound scattering in bubble structures in a liquid is due to the resonant nature of sound scattering on bubbles. The correspondence between theoretical and experimental results is shown.

The work was carried out as part of the state assignment on the topics FWMM-2024-0015, reg. No. 124022100075-6 and FWMM-2024-0014, reg. No. 124022100072-5.

Keywords: nonlinearity, absorption, sound scattering, bubbles

PACS: 43.20.+g; 43.20.Fn; 43.25.Yw; 43.30.+m

Введение

В воде в обычных условиях всегда содержатся газовые или паро-газовые пузырьки, которые значительно влияют на акустические характеристики жидкостей [1-3]. На величину эффекта влияет как абсолютное значение концентрации пузырьков, так и их распределение по размерам [3-5]. Наряду с резонансным рассеянием всегда присутствует фон нерезонансного рассеяния на неоднородностях в жидкости. В работе обсуждены эффекты нестационарного рассеяния звука, которые позволяют отделить резонансные и нерезонансные эффекты и проводить спектроскопию пузырьков в жидкости. В работе обсуждается влияние пузырьков газа на нелинейный акустический параметр морской воды. Установлена взаимосвязь коэффициентов рассеяния, поглощения и скорости звука с параметром акустической нелинейности жидкости при типичных распределениях пузырьков в морской воде.

1 Рассеяние звука

Рассеяние звука можно характеризовать коэффициентом рассеяния m_V, который в Борновском приближении определяется выражением [1-4] $I_s(r) \approx I_i V m_V / r^2$, где $I_s \sim P_s^2$, $I_i \sim P_i^2$ - интенсивности падающего на неоднородность и рассеянного звука соответственно, при этом P_i и P_s - амплитуды падающей на объем V волны и рассеянной в обратном направлении, соответственно, r - расстояние до неоднородности, V - импульсный рассеивающий объем среды, который в случае применения излучателей с узкой диаграммой направленности можно записать в виде $V = \pi r^2 \theta^2 c\tau / 2$, где θ - ширина диаграммы

направленности излучателя, c - скорость звука, τ - длина импульса звука. В итоге можно получить экспериментальное значение коэффициента обратного рассеяния звука в виде $m_{V\exp} = \left(2/\pi\theta^2 c\tau\right)\left(P_s/P_i\right)^2$. Выражение для коэффициента рассеяния звука с частотой ω на пузырьках $m_V(\omega)$ в Борновском приближении можно записать в виде [2-4] $m_V(\omega) = \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} |\, f(R,\omega)|^2\, g(R)dR$, где амплитуда монопольного рассеяния $f(R,\omega) = R/\left[(R_\omega/R)^2 - 1 - i\delta_\omega\right]$, δ_ω – постоянная затухания колебаний резонансных пузырьков, функция распределения по размерам $g(R)$ связана с объемной концентрацией [2, 5] $x = (4\pi/3)\int_{R_{\min}}^{R_{\max}} R^3 g(R)dR$. Резонансный радиус R_ω связан с частотой Миннерта [1-4] $R_\omega \approx \sqrt{3\gamma P_0/\rho}\big/\omega$, где γ – постоянная адиабаты газа, P_0 - гидростатическое давление. В случае монотонной функции $g(R)$, можно записать коэффициент $m_V(\omega)$ в виде $m_V(\omega) = \pi R_\omega{}^3 g(R_\omega)\big/2\delta_\omega$, откуда можно определить функцию $g(R)$ [2-4]:

$$g(R_\omega) = (2\delta_\omega/\pi R_\omega{}^3)m_{V\exp}(\omega). \qquad (1)$$

Вклад нерезонансных пузырьков при монотонной функции $g(R)$ является малым, однако результат может сильно измениться в случае немонотонной функции $g(R)$, например, полученной экспериментально для пузырьков в морской воде [5] в виде $g(R) = A_g R^{-n}\exp\left[-m\left(R_p/R + R/R_m\right)\right]$. Выявление вклада резонансных пузырьков можно осуществить с использованием нестационарного рассеяния. Условно коэффициент рассеяния m_V при наличии резонансных пузырьков $m_V{}^{(b)}$ и других нерезонансных включений $m_V{}^{(s)}$, включая нерезонанасный фон рассеяния от пузырьков, можно записать в виде $m_V = m_V{}^{(b)} + m_V{}^{(s)}$. Учет переходных процессов на резонансе приводит к зависимости $m_V{}^{(b)}$ от длительности импульса τ в виде $m_V{}^{(b)}(\tau) = m_V{}^{(b)}(\infty)F(\tau/\tau_\omega)$. Здесь через $m_V{}^{(b)}(\infty)$ обозначен коэффициент стационарного резонансного рассеяния на пузырьках $m_V{}^{(b)}(\infty) = (\pi/2)R^3 g^{(b)}(R)/\delta(R)$, а функция $F(\tau/\tau_\omega) = 1 - \left[1 - \exp(\tau/\tau_\omega)\right]/(\tau/\tau_\omega)$ определяет нестационарность резонансного рассеяния, где $\tau_\omega = 1/\omega\delta = Q/\omega$, и поэтому помогает на практике отделять резонансное рассеяние от нерезонансного фона, а также определять добротность пузырьков на различных частотах [4, 5]. Применение перестраиваемых по частоте направленных излучателей позволяет реализовать нестационарную акустическую спектроскопию пузырьков [4, 5] в виде:

$$g(R_\omega) = (2\delta_\omega/\pi R_\omega{}^3)\left(m_{V\exp}(\infty) - m_{V\exp}(0)\right). \qquad (2)$$

Обозначения $m_{V\exp}(\infty)$ и $m_{V\exp}(0)$ отвечают условиям $\tau >> \tau_0$ и $\tau << \tau_0$ соответственно.

3 Поглощение и дисперсия скорости звука в жидкости с пузырьками

Поглощение и скорость звука для микронеоднородной среды можно определить в рамках гомогенного приближения с помощью эффективной сжимаемости среды β_e [1, 3, 5]. Обобщение формулы Вуда для эффективной скорости звука $\tilde{c}_e$ записывается в виде [1, 3, 5] $\tilde{c}_e = [\rho_e \beta_e]^{-1/2}$, откуда вещественная часть $c_e = \mathrm{Re}(\tilde{c}_e)$ и мнимая части $\alpha = \omega \mathrm{Im}(1/\tilde{c}_e)$ определяют фазовую скорость c_e и коэффициент поглощения волны давления α. Для жидкости с пузырьками $\rho' << \rho$ и $\beta << \beta'$ и можно написать

$$c_e = c\,\mathrm{Re}\left[\left\{1+\hat{X}K\left(R,\omega\right)/\beta\right\}(1-x)\right]^{-1/2}, \quad \alpha_\omega = (\omega/c)\,\mathrm{Im}\left[\left\{1+\hat{X}K\left(R,\omega\right)/\beta\right\}\right]^{1/2}. \qquad (3)$$

Здесь β - сжимаемость воды, произведение $\hat{X}\varphi$ означает интегральное выражение $\hat{X}\varphi = (4\pi/3)\int_{R_{\min}}^{R_{\max}} dRg(R)R^3\varphi(R)$. Сжимаемость пузырька $K\left(R,\omega\right) = (3/R)\partial R/\partial P$ учитывает резонансные свойства пузырька в зависимости от частоты звука и размера [1, 5].

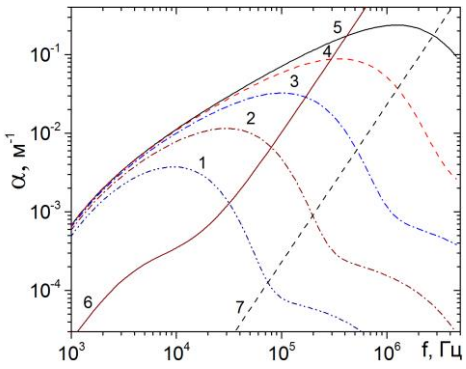


Рис. 1. Зависимость коэффициента поглощения звука от частоты при различных положениях максимума R_p функции $g(R)$. Параметры кривых: 1 - R_p =0.17 мм; 2 - 0.046 мм; 3 - 0.013 мм; 4 - 3.5 мкм; 5 - 1.0 мкм; 6 и 7 – поглощение звука в чистой морской (T=20°C, соленость S=3.5%) и пресной воде.

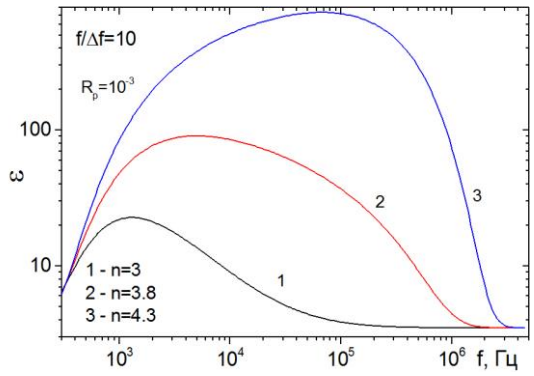


Рис. 2. Зависимость параметра акустической нелинейности воды с газовыми пузырьками ε_e от частоты накачки f при генерации разностных частот $\Delta f = f/10$ при различных показателях n в функции $g(R)$.

На рис. 1 представлены зависимости $\alpha(\omega)$ при различных положениях R_p функции $g(R)$ с следующими параметрами: $A_g = 10^{-8}$ см$^{n-4}$, n=3.8; m=1, R_m=2.5 мм. $x \sim 10^{-7}$. Из рис.1 видно, что в частотной зависимости $\alpha(\omega)$ имеется максимум примерно при $\omega_p \approx \sqrt{3\gamma P_0/\rho}\,/R_p$. При $\omega < \omega_p$ основной вклад дают резонансные пузырьки, а при $\omega > \omega_p$ появляется спад $\alpha(\omega)$ и основной вклад связан с нерезонансным фоном.

Дисперсия скорости звука в среде с резонансными пузырьками обычно считается отсутствующей, тем не менее, учет ассиметрии функции $g(R)$ приводит к появлению слабой дисперсии, которая связана с вкладом нерезонансных пузырьков. При концентрациях $x << x_* \sim 0.05$ можно получить зависимость в виде [5] $\Delta c_e / c = (c_e - c)/c \approx -xc^2 / 2c'^2$.

4 Акустическая нелинейность в пузырьковом слое

Жидкость с пузырьками имеет повышенную нелинейность, определяемую эффективным нелинейным параметром, равным $\varepsilon = \varepsilon_b + \varepsilon_0$, где $\varepsilon_0 \sim 3 \div 5$ - нелинейный параметр жидкости без пузырьков, ε_b связан с вкладом пузырьков [1, 5]:

$$\varepsilon_b = 2\pi c^4 \int_0^\infty \frac{3(\gamma+1)\omega_R{}^2 - (\omega_1{}^2 + \omega_2{}^2 - \omega_1\omega_2)}{Rq_1q_2q_\Omega} g(R)dR, \qquad (4)$$

Здесь $q_{1,2} = \omega_R{}^2 - \omega_{1,2}{}^2 - i\omega_{1,2}{}^2\delta_{1,2}$, $q_\Omega = \omega_R{}^2 - \Omega^2 - i\Omega^2\delta_\Omega$, $\Omega = \omega_1 - \omega_2$, индексы 1 и 2 отмечают, что величины соответствуют частотам ω_1 и ω_2, ω_R - резонансная частота пузырька. Интегрирование уравнения (4) с учетом немонотонной функции $g(R)$ приводит к ε_b в виде:

$$\varepsilon_b(\omega,\Omega) = \frac{\pi^2 c^4}{\omega^4}\begin{cases} (2/n_1)(\omega/\Omega)^2 g_1(R_p), & \omega_p/\omega << \Omega/\omega << 1 \\ (3\gamma+2)g_2(R_\omega)/(\delta - i\Omega/\omega) + i(\omega/\Omega)^2 g_1(R_\Omega), & \Omega/\omega << \omega_p/\omega << 1 \\ (3\gamma+2)g_1(R_\omega)/(\delta - i\Omega/\omega) + i(\omega/\Omega)^2 g_1(R_\Omega), & \Omega/\omega << 1 << \omega_p/\omega \end{cases} \qquad (5)$$

Здесь обозначения $g_1(R)$ и $g_2(R)$ отмечают различные ветви функции $g(R)$, соответственно, возрастающую ($R_p < R < R_m$) и ниспадающую ($R < R_p < R_m$). Отличие (5) для ε_b от известных формул [1] (нижняя строка в (5)), заключается в учете вклада нерезонансных пузырьков. Полученные результаты иллюстрируются на рис.2 зависимостями параметра акустической нелинейности воды с газовыми пузырьками от частоты накачки f при генерации разностных частот $\Delta f = f/10$ при различных показателях n в функции $g(R)$.

Учитывая, что все акустические параметры существенно связаны с функцией $g(R)$, можно определить связь этих характеристик между собой. Используя полученные формулы, можно получить аналитические соотношения между α_ω, $m_{V\omega}$, ε_b и $g(R)$:

$$\alpha_\omega \approx A_\alpha R_\omega{}^3 g(R_\omega) = (2A_\alpha\delta_\omega/\pi)m_{V\omega} \approx 500\delta_\omega m_{V\omega}, \quad \varepsilon_b(\omega,\Omega) \approx E_\varepsilon(c/\omega)\alpha_\omega/[\delta_\omega - i(\Omega/\omega)]. \qquad (6)$$

Здесь $A_\alpha = \pi^2\sqrt{\rho c^2 K/3} \approx 800$, $E_\varepsilon = (\gamma + 2/3)(\rho c^2 K) \approx 10^5$. На рис. 3 и рис.4 представлены результаты для α_ω и ε на частоте 145 кГц в приповерхностном слое пузырьков, откуда видно избыточное поглощение звука и нелинейного параметра в пузырьковом слое. На больших глубинах α_ω и ε стремятся к соответствующим значениям в чистой воде.

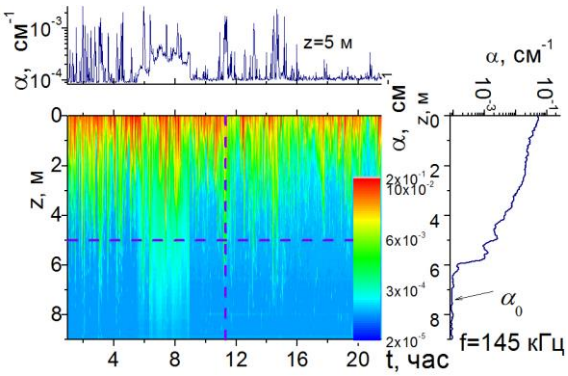


Рис. 3. Коэффициент поглощения звука на частоте 145 кГц в приповерхностном слое пузырьков.

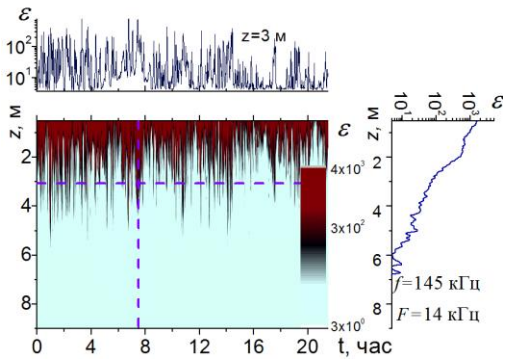


Рис. 4. Нелинейный параметр в облаке пузырьков.

Заключение

Выявлен вклад резонансного и нерезонансного рассеяния и поглощения звука при различных функциях распределения пузырьков по размерам $g(R)$. Определена частота ω_p, ниже которой реализуется акустическая спектроскопия пузырьков. Показано, что параметр акустической нелинейности жидкостей с газовыми пузырьками зависит как от соотношения частот накачки и комбинационных частот, так и от соотношений между резонансными частотами и частотой ω_p, отвечающей максимуму функции распределения пузырьков по размерам. Получены аналитические соотношения между коэффициентами рассеяния и поглощения звука и параметром акустической нелинейности.

Работа выполнена в рамках госзадания по темам FWMM-2024-0015, рег. № 124022100075-6 и FWMM-2024-0014, рег. № 124022100072-5.

Список литературы

1. *Наугольных К.А., Островский Л.А.* Нелинейные волновые процессы в акустике. Наука. М. 1990.
2. *Medwin H.* Acoustical determination of bubble size spectra // J. Acoust.Soc.Am. 1977. V. 62, P. 1041-1044
3. *Liu, R.; Li, Z.* The Effects of Bubble Scattering on Sound Propagation in ShallowWater // J. Mar. Sci. Eng. 2021, V.9, P.1441.
4. *Akulichev V.A., Bulanov V.A.* Measurements of bubbles in sea water by nonstationary sound scattering // J. Acoust. Soc. Am. 2011. V.130, P.3438-3449.
5. *Акуличев В.А., Буланов В.А.* Акустические исследования мелкомасштабных неоднородностей в морской среде. ТОИ ДВО РАН. Владивосток, 2017. 414 с.

УДК 534.29 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39491

Экспериментально-теоретическое определение дисперсного состава пузырьков газа в жидкости

Кожарин Н.Ю. [a], **Павлов Г.И.** [b], **Галеева Л.Х.**
КНИТУ-КАИ им. А.Н.Туполева, 420111, г. Казань, ул. Карла Маркса, д.10
E-mail: [a] negesti@mail.ru, [b] pavlov16@mail.ru

Аннотация. Пузырьки в жидкой среде влияют на распространение звуковых волн и изменяют акустические характеристики вещества. Это свойство можно применять для подавления вибраций, возникающих в технических системах. На базе учебно-исследовательского центра КНИТУ-КАИ им. А.Н.Туполева, г.Казань, проводятся эксперименты по изучению поведения газовых пузырьков в воде под влиянием звуковых колебаний. Цель исследований – выявить количественные закономерности влияния частоты колебания и объемного содержания газа на дисперсный состав пузырьков в смеси газа и жидкости. Эксперименты проводятся на специально сконструированном стенде с проведением фотофиксации. В результате обработки фотоснимков получена характеристика дисперсного состава пузырьков в жидкости. Выявлены закономерности изменений дисперсного состава пузырьков под влиянием звуковых колебаний.

В работе представлено описание экспериментального стенда для изучения влияния звукового давления на пузырьки газа, дано описание методики выполнения экспериментов и краткий анализ полученных результатов. Ранее аналогичные опыты были проведены при объемном содержании газов в жидкости порядка 6%. В представленной работе газосодержание составляет не более 1%

Ключевые слова: «пузырьки газа», «дисперсный состав пузырьков», «собственная частота колебаний».

1. Введение

В ранее изданных публикациях подчеркивается, что затухание акустической энергии в газонасыщенных жидкостях в первую очередь определяется объемной долей газа в этой среде, а также соответствием частоты звуковой волны резонансной частоте пульсаций пузырька, которая зависит от его размера, например, в [1]. Исследования о характере образования пузырей с увеличением массового расхода воздуха при

неизменных габаритах распылителя представлены в работах [2,3]. Цель проведения описанных исследований – выявить количественные закономерности влияния частоты колебания и объемного содержания газа на дисперсный состав пузырьков в смеси газа и жидкости при малом газосодержании. Поставленная цель достигалась постановкой двухфакторного эксперимента, в котором независящими факторами явились частота колебания f (Гц) и амплитуда сигнала А (мВ). Объемное содержание газа в жидкости φ (%) во время экспериментов не изменено и составляло не более 1%. Эксперименты по визуализации поведения газовых пузырей в жидкости (воде) проводились на стенде, общий вид которого приведен на рисунке 1.

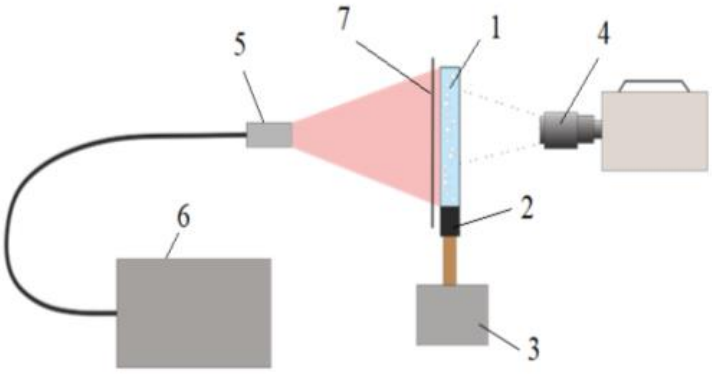


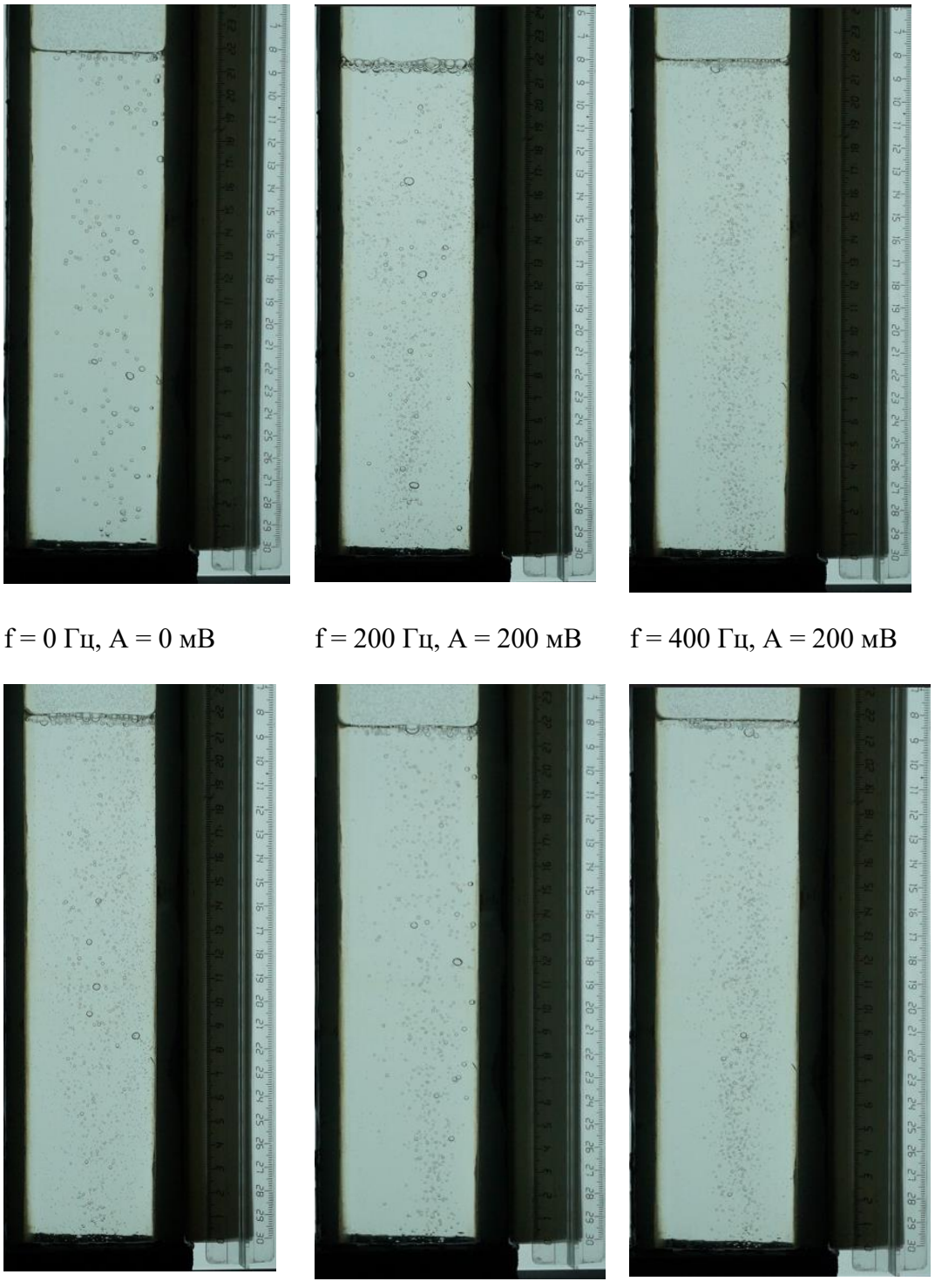
Рисунок 1. Принципиальная схема экспериментального стенда.

Стенд включал в себя следующие основные элементы: 1 – объект исследования, стеклянная труба с одним открытым концом; 2 – поршень; 3 – вибростол; 4 – скоростная кинокамера; 5 – источник лазерной подсветки; 6 – блок генератора лазерного излучения; 7 – матовый экран. Подача газа в жидкость осуществлялась из баллона со сжатым газом, обработка результатов экспериментов выполнялась на персональном компьютере. Дисперсная характеристика газожидкостной среды определялись по фотоснимкам. Для обработки фотографий использовался программный пакет Image-Pro Plus предназначенный для обработки и анализа изображений, полученных при научных исследованиях. Программа позволяет систематизировать, сравнивать, анализировать, визуализировать с использованием таблиц результаты экспериментов.

2. Экспериментальное исследование и анализ результатов

Для установление зависимости дисперсного состава пузырьков в воде от частоты вынужденных колебаний системы на экспериментальном стенде проведена серия опытов с фотофиксацией состояния газопузырьковой среды при разной частоте

вибраций с разным значением амплитуды сигнала колебательных процессов. Нижняя граница интервала частот соответствовала f = 200 Гц, верхняя f = 600 Гц. Нижний предел изменения аплитуды A = 200 мВ, верхний предел φ = 400 мВ. Объемное содержание газа в жидкости φ (%) составляло не более 1%.



f = 0 Гц, A = 0 мВ f = 200 Гц, A = 200 мВ f = 400 Гц, A = 200 мВ

f = 400 Гц, A = 400 мВ f = 600 Гц, A = 200 мВ f = 600 Гц, A = 400 мВ

Рисунок 2. Результаты фотофиксации.

Результаты фотиксации представлены на рисунке 2.

В ходе изучения результатов экспериментов выделены 5 групп пузырьков в зависимости от размера пузырьков. Для каждой из групп посчитано общее количество пузырьков (N) и их средний размер ($D_п$). В таблице 1 представлены основные результаты.

Таблица 1. Результаты опытов

Наименование	Группа 1	Группа 2	Группа 3	Группа 4	Группа 5
Условия	f = 0 Гц, A = 0 мВ				
N, шт	29	72	18	114	19
% от N	11,5	28,6	7,1	45,2	7,5
Dп, мм	0,4	0,7	1,2	1,6	2,4
Условия	f = 200 Гц, A = 200 мВ				
N, шт	232	1036	243	72	38
% от N	14,3	63,9	15,0	4,4	2,3
Dп, мм	0,4	0,6	1,0	1,5	2,3
Условия	f = 400 Гц, A = 200 мВ				
N, шт	166	936	340	60	9
% от N	11,0	61,9	22,5	4,0	0,6
Dп, мм	0,4	0,7	1,1	1,6	2,3
Условия	f = 400 Гц, A = 400 мВ				
N, шт	329	1244	326	71	16
% от N	16,6	62,6	16,4	3,6	0,8
Dп, мм	0,4	0,6	1,0	1,5	2,5
Условия	f = 600 Гц, A = 200 мВ				
N, шт	51	313	238	34	16
% от N	7,8	48,0	36,5	5,2	2,5
Dп, мм	0,4	0,7	1,1	1,5	2,4
Условия	f = 600 Гц, A = 400 мВ				
N, шт	113	707	300	57	13
% от N	9,5	59,4	25,2	4,8	1,1
Dп, мм	0,4	0,7	1,1	1,6	2,3

В результате анализа данных эксперимента можно сделать вывод о том, что с увеличением частоты вибраций увеличивается количество пузырьков меньшего размера (группы 2), средним диаметром порядка 0,7 мм. При этом максимальное значение пузырьков достигается при частоте вибраций 400 Гц. Увеличение количества пузырьков группы 2 обеспечивается за счет сокращения более крупных пузырьков, в первую очередь группы 4.

Увеличение амплитуды сигнала колебаний приводит к интенсификации образования более мелких пузырей. Такая динамика наблюдается на всех исследуемых частотах.

Особый интерес представляет картина образования пузырьков при частоте вибраций 200 Гц с увеличением амплитуды сигнала до 400 мВ. В этих условиях возникают сильные пульсационные процессы и пузырьки газа скапливаются в узлах давления акустической волны.



Рисунок 3. Фотоснимок газопузырькой среды при f = 200 Гц, A = 400 мВ

Это говорит о том, что на этой частоте в газопузырьковой среде возникают стоячие волны. Возникновение стоячих волн оказывает существенное влияние на дисперсный состав пузырьков в смеси газа и жидкости. Данный факт необходимо учитывать при проектировании инженерных систем с использованием пузырьков газа в качестве подавления вибраций.

3. Заключение

В результате проделанной работы можно сделать следующие основные выводы:

1. Увеличением частоты вибраций приводит к росту количества пузырьков меньшего размера, средним диаметром порядка 0,7 мм. При этом максимальное значение пузырьков достигается при частоте вибраций 400 Гц.

2. Увеличение амплитуды сигнала колебаний приводит к интенсификации образования более мелких пузырей.

3. При определенных условиях имеет место возникновение стоячих волн, что существенно сказывается на дисперсном составе газопузырьковой жидкости.

Результаты исследования позволят глубже и обширнее изучить механизмы формирования газопузырьковой жидкости под воздействием колебаний среды в целях дальнейшего прикладного применения в различных отраслях и направлениях исследований.

Список литературы

1. А.А. Авдеев «Пульсации газового пузыря в акустическом поле (резонанс и границы политропического приближения)» Теплофизика высоких температур, 2014, том 52, № 6, с. 875–885

2. И.С. Сухарев, Экспериментальное определение размеров пузырьков газа при истечении в системе воздух/вода

3. А. Е. Гореликова, О. Н. Кашинский, В. В. Рандин, А. В. Чинак, Влияние расхода газа на диаметр газовых пузырей в восходящем пузырьковом течении в плоском наклонном канале.

УДК: 620.179.16 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39492

Keywords: digital aperture focusing (DAF), AR-model, Compressive Sensing (CS), cepstrum, Minimum Entropy Deconvolution (MED).

PACS: 43.35.Zc

Введение

Основные задачи ультразвукового неразрушающего контроля (УЗК) заключаются в обнаружении отражателя, определении его типа (объёмный или плоскостной), измерения его размеров и координат. Для решения этих задач изображения отражателей можно восстанавливать методом цифровой фокусировки апертуры (ЦФА). Для повышения пространственного разрешения изображений можно использовать антенные решётки, работающие на более высоких частотах. Однако такой подход сопряжён с ограничениями: рост частоты сопровождается усилением затухания сигнала и увеличением уровня шума. В качестве альтернативы можно применять математические методы обработки А-сканов или изображений, позволяющие восстанавливать изображения отражателей, как если бы А-сканы были зарегистрированы на вдвое или втрое более высокой частоте, чем та на которой работает реальная антенная решётка. Существует ряд методов для достижения эффекта сверхразрешения. Один из них – позволяет построить авторегрессионную модель (AR) [1] спектр эхосигнала и экстраполировать его за пределы реальной полосы пропускания дефектоскопа, что приводит к получению эффекта сверхразрешения. Метод распознавания со сжатием (Compressive Sensing (CS)) [2, 3] позволяет восстанавливать разрежённые А-сканы с достижением эффекта сверхразрешения. Но упомянутые методы предполагают, что известен импульсный отклик ультразвукового дефектоскопа. Разработан ряд методов, которые позволяют проводить деконволюцию, не зная формы импульсного отклика, так называемая слепая деконволюция. К ним относится кепстральный анализ [4] и метод минимальной энтропийной деконволюции (Minimum Entropy Deconvolution, MED) [5].

1 Получение импульсного отклика из измеренных эхосигналов

Измеренный ультразвуковой сигнал $y(t)$ можно представить в виде свёртки входного воздействия $x(t)$ в виде набора δ-импульсов с импульсным откликом $h(t)$ дефектоскопа

$$y(t) = x(t) \otimes h(t) + n(t), \quad (1)$$

где $n(t)$ – аддитивный шум измерений, $\otimes$ – оператор свёртки. Задача восстановления формы входного воздействия $x(t)$ по измеренному эхосигналу $y(t)$ называется задачей деконволюции. Её решение предполагает знание формы импульсного отклика $h(t)$. Для этого можно провести либо специальные измерения, либо оценить импульсный отклик на основе неких предположений, например, что импульсный отклик имеет форму гауссоподобного сигнала.

1.1 Кепстральный анализ

Обратное преобразование Фурье логарифма спектра сигнала $y(t)$ называется кепстром

$$y_{cepstr}(t) = \Im^{-1}\left(\ln\left(\Im\left(y(t)\right)\right)\right), \quad (2)$$

где $\Im$, $\Im^{-1}$ – операторы прямого и обратного преобразования Фурье. Важнейшее свойство кепстра $y_{cepstr}(t)$ заключается в его способности разделить во времени информацию об импульсном отклике $h(t)$ дефектоскопа и δ-подобных импульсов от отражателей, то есть о входном сигнале $x(t)$. Если обнулить кепстр вне небольшой временной области в начале оси времени, сделать его прямое преобразование Фурье, возвести экспоненту в степень полученной функции и выполнить обратное преобразование Фурье, то можно получить оценку импульсного отклика $h_{cepstr}(t)$ дефектоскопа. Если обнулить кепстр внутри временной области и выполнить те же действия, что и выше, то можно получить оценку входного сигнала $\hat{x}(t)$ со сверхразрешением в виде набора δ-импульсов, что означает выполнение слепой деконволюции. К сожалению, эффект сверхразрешения можно получить при уровне шума меньше -60 дБ, который не достижим на практике.

1.2 Метод минимальной энтропийной деконволюции

Идея метода MED заключается в том, чтобы найти такой обратный фильтр $h_{inv}(t)$, который преобразует измеренный сигнал $y(t)$ в сигнал, близкий к исходному $x(t)$. Метод MED позволяет найти обратный фильтр $h_{inv}(t)$, обладающий свойством

$$h_{inv}(t) \otimes h(t) = \delta(t), \quad (3)$$

где $\delta(t)$ – дельта-функция. Фильтр $h_{inv}(t)$ можно представить в виде линейной свёртки

$$y_i = \sum_{k=0}^{p-1} h_{inv,k}\ x_{i-k}, \quad (4)$$

где $h_{inv,k}$ – коэффициенты фильтра, p – его порядок. На первом этапе применения метода MED решая задачу оптимизации находятся коэффициенты инверсного фильтра $h_{inv,k}$

$$\hat{h}_{inv} = \underset{\hat{h}_{inv} \in \Re^p}{\arg\max} V(y), \text{ где } V(y) = \sum_{i=1}^{N} y_i^4 \Big/ \left(\sum_{i=1}^{N} y_i^2\right)^2. \quad (5)$$

На втором этапе измеренный сигнал $y(t)$ пропускается через инверсный фильтр $h_{inv,k}$, что позволяет получить оценку входного сигнала $\hat{x}(t)$. Это и будет являться решением задачи слепой деконволюции. При отсутствии шума оценка входного сигнала $\hat{x}(t)$ будет представлять собой набор δ-импульсов амплитудой a_m и с временем задержки t_m. Попытка применить метод MED для достижения сверхразрешения ультразвуковых сигналов оказалась недостаточно успешной – эхосигналы сузились в 1.5...2 раза, что характерно для обычной инверсной фильтрации. Метод MED согласно формуле (5) позволяет найти коэффициенты инверсного фильтра h_{inv}, по которому можно оценить форму инверсного импульсного отклика $\hat{h}_{inv}(t)$, и который в свою очередь позволяет оценить импульсный отклик дефектоскопа

$$h_{MED}(t) = \Im^{-1}\left(1 \Big/ \Im\left(\hat{h}_{inv}(t)\right)\right). \quad (6)$$

2 Модельные эксперименты

Модельные эксперименты проводились с использованием дефектоскопа АВГУР-АРТ, разработанного и изготовляемого в «Научно-производственном центре «ЭХО+» [6]. В цилиндрическом образце диаметром 55 мм из стали марки Ст20 было просверлено три боковых цилиндрических отверстия (БЦО) диаметрами 4, 3 и 2 мм. Эхосигналы измерялись в иммерсионном режиме антенной решёткой с рабочей частотой 2.5 МГц в 36 положениях при её движении с шагом 5 мм вдоль окружности цилиндра. Парциальные изображения, полученные для каждого положения когерентно, складывались. На Рис. 1, а показано изображение сечения всего образца, а на Рис. 1, б представлен его фрагмент с индикацией БЦО диаметром 2 мм. Так как длина продольной волны равна 2.6 мм, то разрешилась индикация границы БЦО диаметром только 4 мм.

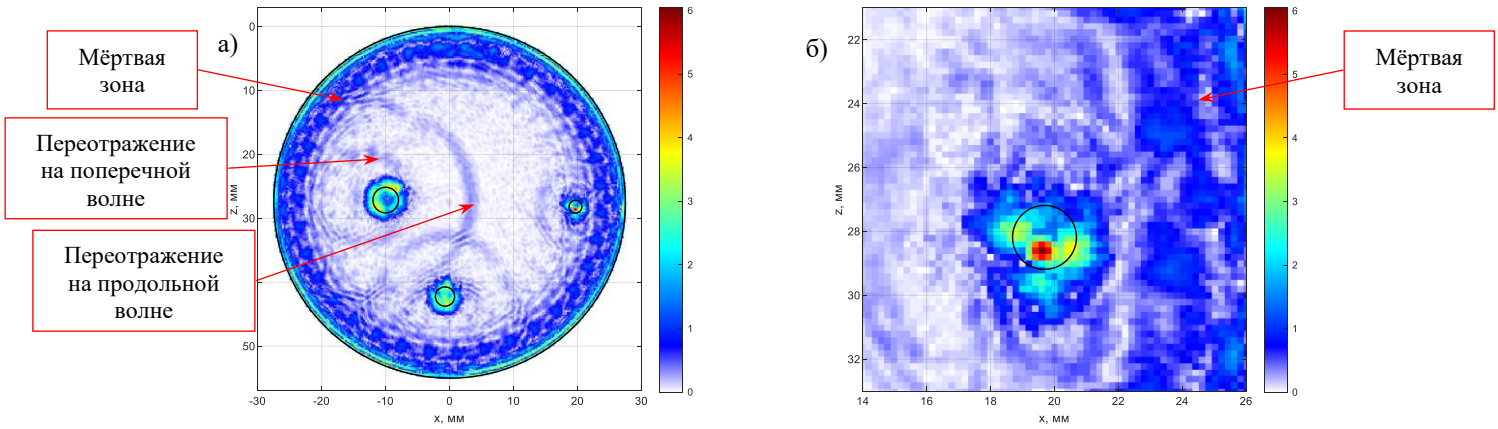


Рис. 1. Изображение, восстановленное по исходным эхосигналам: а) трех БЦО, б) БЦО диаметром 2 мм

2.1 Получение импульсного отклика с помощью кепстра

На Рис. 2, а показано изображение сечения всего образца, после построения AR-модели спектров эхосигналов с использованием импульсного отклика $h_{cepstr}(t)$. Разрешающая способность увеличилась примерно в 1.5 раза по сравнению с Рис. 1, что позволило разрешить индикации границы БЦО диаметром 2 мм (На Рис. 2, б). Отношение сигнал/шум практически не изменилось.

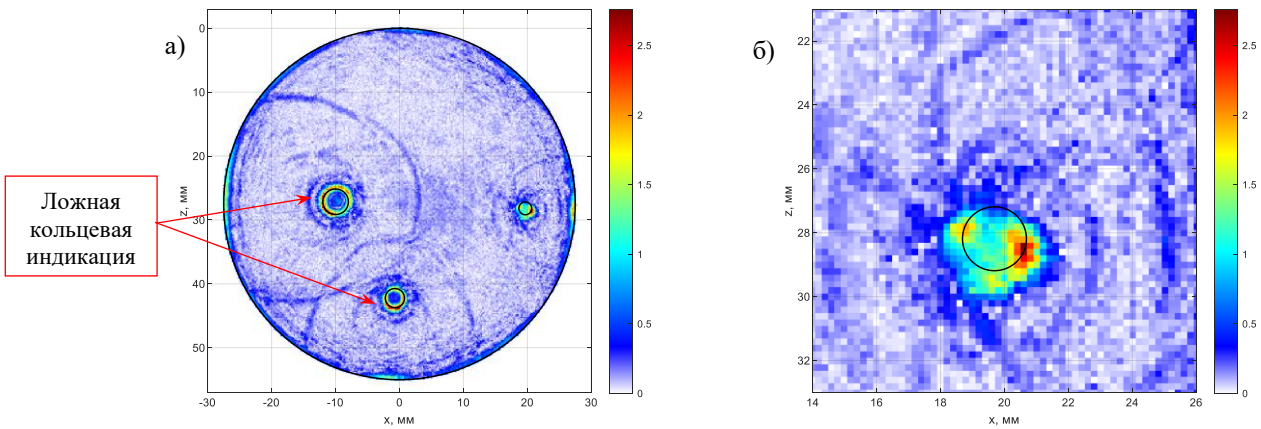


Рис. 2. Изображение, восстановленное по эхосигналам, полученным после построения AR-модели с использованием импульсного отклика $h_{cepstr}(t)$: а) трех БЦО, б) БЦО диаметром 2 мм

После применения метода CS лучевая разрешающая способность изображения на Рис. 3 возросла примерно в 2.5 раза по сравнению с Рис. 2. В результате удалось уверенно разрешить границы БЦО диаметром 2 мм (Рис. 3, б). Однако уровень шума по сравнению с Рис. 2 возрос примерно на 2 дБ. Ложные кольцевые индикации, которые появились на Рис. 2, а, исчезли.

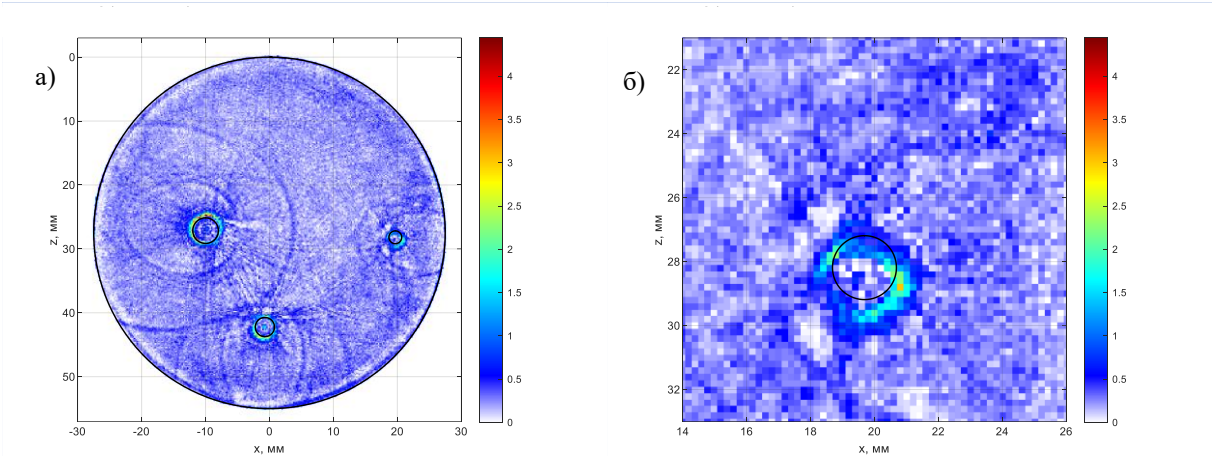


Рис. 3. Изображение, восстановленное по эхосигналам после применения метода CS с использованием импульсного отклика $h_{cepstr}(t)$: а) трех БЦО, б) БЦО диаметром 2 мм

2.2 Импульсный отклик получен с помощью MED

На Рис. 4, а показано изображение сечения всего образца, после построения AR-модели спектров эхосигналов с использованием импульсного отклика $h_{MED}(t)$. Полученные изображения близки к изображениям на Рис. 2.

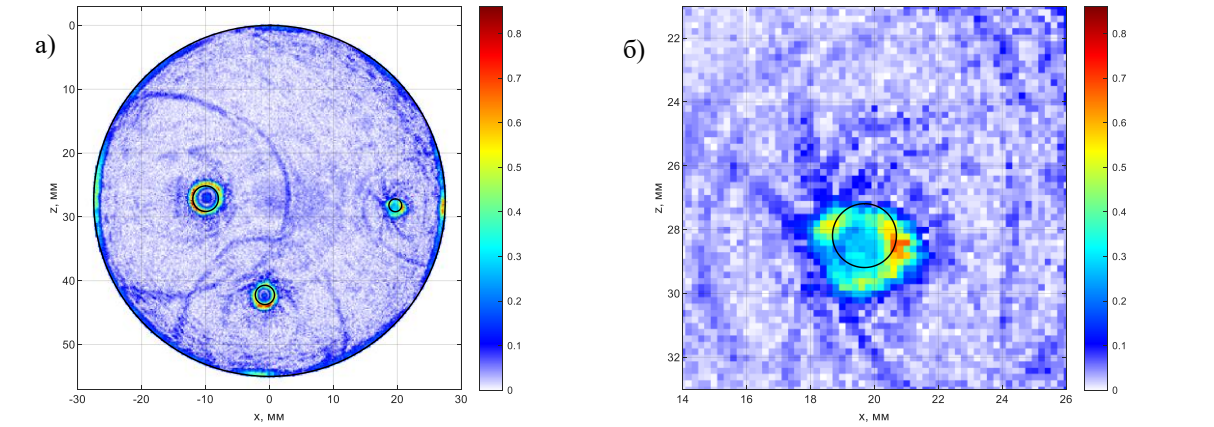


Рис. 4. Изображение, восстановленное по эхосигналам, полученным после построения AR-модели с использованием импульсного отклика $h_{MED}(t)$: а) трех БЦО, б) БЦО диаметром 2 мм

После применения метода CS лучевая разрешающая способность изображения на Рис. 5 практически не изменилась по сравнению с Рис. 3. Отношение сигнал/шум возросло примерно на 2 дБ, а индикации, сформированные переотражёнными от цилиндрической поверхности импульсами, стали хорошо различимы. Можно сделать вывод, что оценка импульсного отклика дефектоскопа, полученного с помощью метода MED, оказалась наиболее точной.

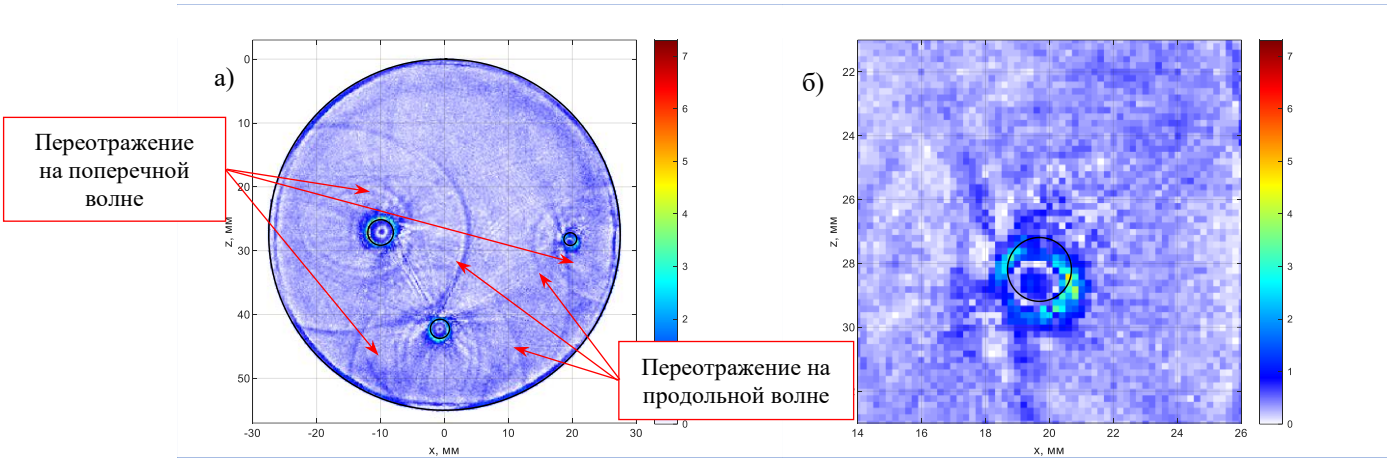


Рис. 5. Изображения, восстановленные по эхосигналам, полученным после применения метода CS с использованием импульсного отклика $h_{MED}(t)$: а) трех БЦО, б) БЦО диаметром 2 мм

Заключение

Для оценки импульсного отклика дефектоскопа предложено использовать кепстральный анализ и метод MED. Это важно для применения метода построения AR-модели спектра эхосигнала или метода CS с целью получения сверхразрешения.

Результаты модельных экспериментов на цилиндрическом образце диаметром 55 мм с тремя БЦО, показали, что применение метода MED для определения импульсного отклика оказалось более эффективным по сравнению с кепстральным анализом. Оба метода позволили повысить лучевую разрешающую способность изображений отражателей примерно в 5 раз.

Метод CS оказался более устойчивым к ошибкам определения импульсного отклика, в отличии от метода построения AR-модели спектра эхосигнала.

Список литературы

1. Базулин Е.Г. Обработка TOFD-эхосигналов с целью достижения сверхразрешения // Дефектоскопия. 2021. №5. С. 13-21.
2. Граничин О.Н. Рандомизация измерений и l_1-оптимизация // Стохастическая оптимизация в информатике. 2009. № 5. С. 3-23.
3. Базулин Е.Г. Применение метода распознавания со сжатием для достижения сверхразрешения эхосигналов // Дефектоскопия. 2022. №5. С. 24-36. А
4. Базулин Е.Г., Крылович А.А. Кепстральный анализ ультразвуковых эхосигналов, измеренных антенной решёткой, с целью получения изображения отражателей со сверхразрешением // Дефектоскопия. 2025. №4. С. 3-15.
5. Wiggins R. A. Minimum entropy deconvolution // Geoexploration. 1978. V. 16, № 1-2. P. 21-35.
6. Официальный сайт фирмы НПЦ «ЭХО+». — Текст: электронный // ЭХО+. — [Б.м.], [б.и.], [б.г.]. — URL: https://echoplus.ru/ (дата обращения: 01.04.2026).

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39493

Электромеханические свойства монокристаллов тетрабората свинца

Турчин П.П.[1)2)], Турчин В.И.[1)], Бурков С.И.[1)], Зайцев А.И.[2)], Пляскин М.Е.[1)], Чулкова М.Ю.[1)]

[1)]Сибирский федеральный университет, город Красноярск;
[2)] Институт физики им. Л.В.Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН, город Красноярск;
Тел.: (+7 904 890 50 94); E-mail: (pturchin@sfu-kras.ru)

Для определения электромеханических постоянных ромбического монокристалла тетрабората свинца использован кристаллоакустический метод особенных направлений. Упругие постоянные C_{ijkl} определены из экспериментальных значений скоростей объемных акустических волн, измеренных эхо-импульсным ультразвуковым методом. Для определения пьезоэлектрических постоянных e_{ijk} и d_{ijk} дополнительно применены квазистатические измерения. Полученные значения материальных постоянных применены для анализа анизотропии параметров объемных и поверхностных акустичбеских волн в монокристаллах тетрабората свинца.

Ключевые слова: электромеханические постоянные, тетраборат свинца, акустические волны

Electromechanical properties of lead tetraborate single crystals

Turchin P.P.[1)2)], Turchin V.I.[1)], Burkov S.I.[1)], Zaitsev A.I.[2)], Plyaskin M.E.[1)], Chulkova M.Yu.[1)]

[1)] Siberian Federal University Krasnoyarsk, Russian Federation;
[2)] Kirensky Institute of Physics Federal Research Center KSC SB RAS Krasnoyarsk, Russian Federation
Тел.: (+7 904 890 50 94); E-mail: (pturchin@sfu-kras.ru)

The crystal-acoustic method of special directions was used to determine the electromechanical constants of an orthorhombic lead tetraborate single crystal. The elastic constants Cijkl were determined from experimental values of bulk acoustic wave velocities measured by the echo-pulse ultrasound method. Quasi-static measurements were additionally used to determine the piezoelectric constants eijk and dijk. The obtained material constant values were used to analyze the anisotropy of bulk and surface acoustic wave parameters in lead tetraborate single crystals.

Key words: electromechanical constants, lead tetraborate, acoustic waves

УДК: 548.5.01; 534.86 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39495

Акустические исследования процессов плавления и кристаллизации наноструктурированных сплавов галлий-серебро в порах синтетических опалов

Х.А. Абдуламонов[a], А.Л. Пирозерский[b], Е.В. Чарная[c]

Санкт-Петербургский Государственный Университет, Физический факультет,

ул. Ульяновская 1, Санкт-Петербург, Петродворец, 198504 Россия

E-mail: [a] khakimaaaa@gmail.com, [b] piroz@yandex.ru, [c] e.charnaya@spbu.ru

Аннотация: В работе представлены результаты ультразвуковых исследований фазовых переходов кристаллизация и плавление в бинарных эвтектических сплавах Ag-Ga с долей серебра 1.5 ат.% и 3.0 ат.%, внедренных в поры синтетических опаловых матриц. Измерены температурные зависимости скорости продольных ультразвуковых волн частотой 7 МГц в широком температурном диапазоне при полных и частичных циклах охлаждение-нагрев. Определены температурные интервалы плавления и кристаллизации сплавов в порах. На основании полученных данных обсуждается изменения фазовой диаграммы системы Ag-Ga в условиях ограниченной геометрии.

Ключевые слова: нанокомпозиты, плавление и кристаллизация в нанопорах, размерные эффекты, эвтектические галлиевые сплавы, ультразвуковой импульсно-фазовый метод.

Acoustic studies of melting and crystallization of nanostructured gallium-silver alloys in the pores of synthetic opals

Kh.A. Abdulamonov[a], A.L. Pirozerski[b], E.V. Charnaya[c]

Faculty of Physics, Saint-Petersburg State University. St.Petersburg, 198504, Russia.

E-mail: [a] khakimaaaa@gmail.com, [b] piroz@yandex.ru, [c] e.charnaya@spbu.ru

Abstract: The report presents the results of ultrasound studies of crystallization and melting phase transitions in binary eutectic Ag-Ga alloys with a silver content of 1.5 at.% and 3.0 at.% embedded in the pores of synthetic opal matrices. The temperature dependences of the velocity of longitudinal ultrasonic waves with a frequency of 7 MHz over a wide temperature range at full and partial cooling-heating cycles were measured. The temperature ranges of melting and crystallisation of the alloys in the pores are determined. Based on the data obtained, the changes in the phase diagram of the Ag-Ga system under confined geometry conditions are discussed.

Keywords: nanocomposites, melting and crystallization in nanopores, dimensional effects, eutectic gallium alloys, ultrasonic pulse-phase method.

PACS: 62.65.+k, 62.25.-g, 64.70.dj, 64.70.dg, 65.80.-g

Введение

Активное применение наноструктурированных материалов в современной науке и технике стимулирует фундаментальные исследования различных физических явлений и процессов, в частности, агрегатных фазовых переходов (ФП), в условиях ограниченной геометрии. Для однокомпонентных систем процессы плавления и кристаллизации в порах уже достаточно хорошо исследованы, см. [1-3] и ссылки в них. Практически для всех материалов общим являлось размытие ФП, воспроизводимый температурный гистерезис между плавлением и кристаллизацией и размерный сдвиг температур переходов.

Для бинарных и многокомпонентных систем плавление и кристаллизация в условиях ограниченной геометрии исследованы значительно меньше. Для таких систем возникает важный вопрос об изменении вида фазовых диаграмм под влиянием наноструктурирования. Ситуация еще более усложняется в случае склонности одного из компонентов системы к полиморфизму, как это имеет место в случае эвтектических галлиевых сплавов. Последние являются, по-видимому, единственным классом бинарных соединений, для которых различными методами, включая методы физической акустики, ЯМР, рентгеновской дифракции и малоуглового рассеяния нейтронов, проведены достаточно подробные исследования ФП плавление и кристаллизации в пористых матрицах с различным размером и геометрией сетки пор (см. [4,5] и ссылки в них).

В настоящей работе акустическими методами проведены исследования плавления и кристаллизации эвтектических сплавов Ag-Ga с долей серебра 1.5 и 3 ат.% в нанокомпозитах на основе синтетических опаловых матриц с размером силикатных шаров около 500 нм.

1 Образцы и методика эксперимента

Синтетические опаловые матрицы представляют собой кубическую плотную упаковку шаров рентгеноаморфного кремнезема, между которыми имеется связная трехмерная сетка пор двух типов – октаэдрических и тетраэдрических (поры первого порядка). В используемых нами матрицах средний диаметр шаров составлял около 500 нм, что, без учета спекания, соответствует размеру октаэдрических пор ~207 нм, а тетраэдрических – примерно 112 нм. Пористость незаполненных опаловых матриц имела величину примерно 26%, то есть были открыты только поры первого порядка.

Сплавы Ga-Ag с долей серебра 1.5 ат.% и 3 ат.% вводились в поры в расплавленном состоянии под давлением ~9 кбар. Из полученных нанокомпозитов вырезались образцы в виде параллелепипедов с толщиной около 2 мм и поперечным сечением 5x5 мм^2. Далее эти образцы обозначаются как Opal-Ag1.5 и Opal-Ag3 в соответствии с долей серебра в сплавах.

Акустические измерения на полученных образцах проводились модифицированным импульсно-фазовым методом [6] на продольных волнах частотой 7 МГц. Скорость ультразвука определялась по разности фаз двух сигналов: прошедшего один раз через исследуемый образец и отраженного от его передней грани. В качестве пьезопреобразователей использовались пластинки ниобата лития Y+36° среза. Акустический контакт образца со звукопроводами обеспечивался вакуумной смазкой Apiezon N.

Температурные зависимости относительного изменения скорости ультразвука $\Delta v = (v - v_0)/v_0$, где v и v_0 – скорости ультразвука при текущей и начальной температуре соответственно, измерялись в полных и частичных циклах охлаждение-нагрев в режиме непрерывного изменения температуры со скоростью около 0.6 К/мин. Перед измерениями образцы предварительно прогревались до температур 320-325 К.

2 Экспериментальные результаты и обсуждение

Результаты акустических измерений в виде температурных зависимостей нормированного относительного изменения скорости ультразвука $\Delta v/\Delta v_{\max}$, где $\Delta v_{\max}$ – максимальное относительное изменение скорости ультразвука в ходе измерений, представлены на рис. 1 и рис. 2 для образцов Opal-Ag1.5 и Opal-Ag3 соответственно.

На представленных температурных зависимостях ФП плавление и кристаллизация соответствуют области резкого и/или нелинейного изменения скорости ультразвука, вне которых температурная зависимость скорости слабо выражена.

При полных циклах (рис. 1,2 (а)) для обоих образцов кристаллизация происходила практически скачком, при этом наблюдалось возрастание температуры образцов за счет выделения скрытой теплоты. Скачкообразный характер кристаллизации, по-видимому, связан с тем, что сетка пор в опале является 3D-связной и фронт кристаллизации, возникший в одной поре, быстро распространяется на весь образец. Температура кристаллизации менялась от цикла к циклу (в диапазоне 271–285 К для образца Opal-Ag1.5 и 262–281 К – для Opal-Ag3), что указывает на переохлаждение сплавов в порах. В тоже время, кривые нагрева для разных циклов практически совпадали. Для образца Opal-Ag1.5 плавление сплава в порах происходило в температурном интервале 287-302 К, для Opal-Ag3 – в интервале 288-303 К. Отметим, что ввиду наличия слабой нелинейности температурной зависимости скорости определение точной температуры начала плавления затруднено.

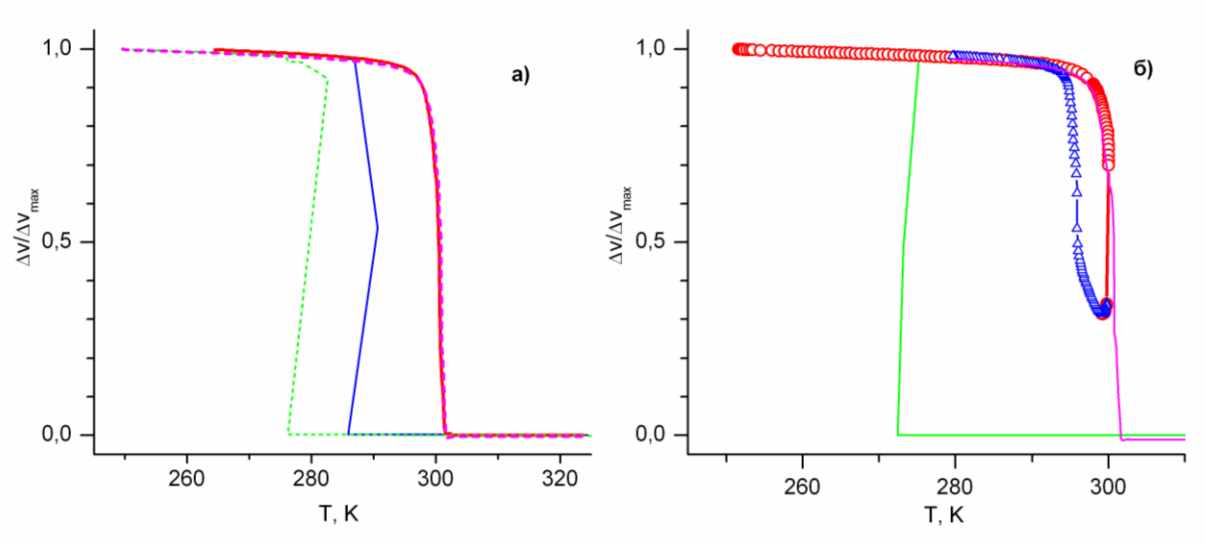


Рис. 1. Температурная зависимость нормированного относительного изменения скорости ультразвука в образце Opal-Ag1.5 для двух полных (а) и частичного (б) циклов. (а) Первый цикл – пунктирные линии, зеленая охлаждение, сиреневая – нагрев; второй цикл – сплошные линии, синяя охлаждение, красная – нагрев. (б) зеленая линия – предварительное охлаждение перед началом цикла, красные кружки – нагрев, синие треугольники – охлаждение, сиреневая линия – нагрев после окончания цикла.

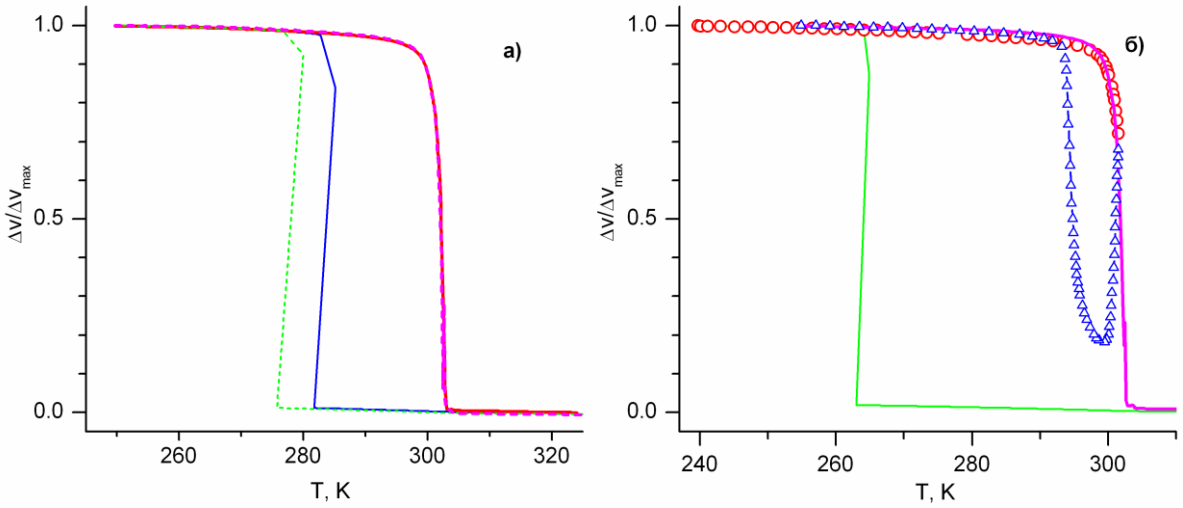


Рис. 2. Температурная зависимость нормированного относительного изменения скорости ультразвука в образце Opal-Ag3 для двух полных (а) и частичного (б) циклов. (а) Первый цикл – пунктирные линии, зеленая охлаждение, сиреневая – нагрев; второй цикл – сплошные линии, синяя охлаждение, красная – нагрев. (б) зеленая линия – предварительное охлаждение перед началом цикла, красные кружки – нагрев, синие треугольники – охлаждение, сиреневая линия – нагрев после окончания цикла.

При частичных циклах (рис. 1 (б) и 2 (б)) образцы предварительно охлаждали до температур 240-250 К, т.е. ниже температуры кристаллизации. Далее образцы нагревали до температур ~ 300-301 К, при которых сплав в порах расплавлялся не полностью. Затем образец снова охлаждали до полной кристаллизации сплава в порах. После этого производился нагрев до ~325 К. Из рис. рис. 1 (б) и 2 (б) видно, что при частичных циклах процесс кристаллизации является частично необратимым и завершается при температуре ~289 К для образца Opal-Ag1.5 и ~291 К – для образца Opal-Ag3, которые близки к температурам начала плавления. Для обоих образцов на кривых нагрева иногда наблюдалась ступеньки в области температур 303-

304 К, более выраженные для образца Opal-Ag3 (см. рис. 2 (б)). Похожая аномалия наблюдалась для сплавов тех же составов, внедренных в пористые стекла [7], что было объяснено формированием в порах небольшой доли высокотемпературной фазы галлия, образующейся в условиях ограниченной геометрии.

На рис. 3 интервалы плавления сплавов Ag-Ga в порах опала сравниваются с интервалами плавления объёмного сплава и сплавов тех же составов, внедренных в пористые стекла [7].

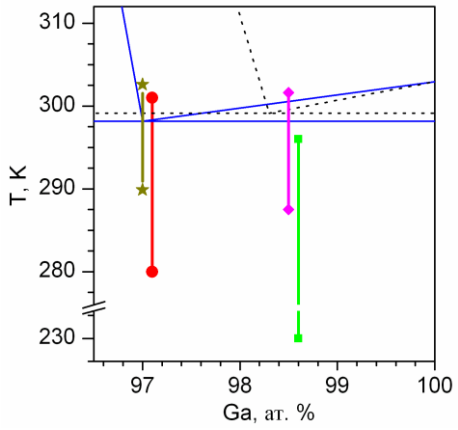


Рис. 3. Фазовая диаграмма системы Ag-Ga в объемном случае по данным работ [8] (синие сплошные линии) и [9] (черные пунктирные линии), и интервалы плавления сплава в порах для образца Opal-Ag1.5 (сиреневые ромбы и линии) и Opal-Ag3 (коричневые звездочки и линии). Для сравнения приведены интервалы плавления сплавов тех же составов в пористых стеклах, по данным работы [7]: 1.5 ат.% Ag – зеленые квадраты и линии, и 3 ат. % Ag – красные кружки и линии. Для образцов пористых стекол с целью наглядности линии смещены вправо по оси абсцисс на 0.1 ат.%.

В литературе имеются разногласия относительно вида фазовой диаграммы объемной системы Ag-Ga [8,9], поэтому на рис. 3 показаны оба варианта. Данные, полученные в настоящей работе, в большей степени согласуются с фазовой диаграммой из работы [8]. Для сплавов в порах опалов интервалы плавления уширены относительно соответствующих интервалов объемных сплавов, в основном за счет снижения температуры начала плавления, однако не так сильно, как в случае пористых стекол. Для сплавов, внедренных в пористые стекла, наблюдалось значительное (~50 К) различие температур начала плавления в зависимости от состава сплава, что объяснялось образованием различных полиморфов галлия [7]. В случае опалов подобного различия не наблюдается. Из рис. 3 следует, что для системы Ag-Ga в порах опала происходит понижение температуры солидуса.

Заключение

Проведенные акустические исследования процессов плавления и кристаллизации эвтектических сплавов галлий-серебро с долей серебра 1.5 и 3 ат.% в порах опаловых матриц выявили значительное уширение интервалов плавления. Сравнение полученных результатов с фазовой диаграммой объемного сплава Ag-Ga позволило сделать предположение о понижении температуры солидуса для сегрегатов со структурой α-Ga в условиях

наноконфайнмента. Показана частичная необратимость плавления для обоих исследованных сплавов. Выявлены аномалии на кривых плавления, связанные с формированием высокотемпературной фазы галлия.

Работа выполнена в рамках инициативного проекта СПбГУ INI_2026 (Pure ID: 147095248). Жидкий азот предоставлен Криогенным отделом Научного парка СПбГУ (проект 2601-049).

Список литературы

1. *Huber P.* Soft matter in hard confinement: phase transition thermodynamics, structure, texture, diffusion and flow in nanoporous media. // J. Phys.: Condens. Matter. 2015. **27**. Art. №. 103102.
2. *Christenson H.K.* Confinement effects on freezing and melting.//J. Phys.: Condens. Matter. 2001. **13**, N 11. P. R95
3. *Lee M.K., Tien C., Charnaya E.V., Sheu H.S., Kumzerov Y.A.* Structural variations in nanosized confined gallium. // Physics Letters A. 2010. **374.** P.1570
4. *Пирозерский А.Л., Чарная Е.В., Недбай А.И.* Акустические исследования фазовых переходов плавление и кристаллизация в индий-галлиевых сплавах, внедренных в поры мезопористых силикатных матриц. // Известия РАН. Серия физическая. 2020. **84**, № 6. С. 803.
5. *Uskov A.V., Charnaya E.V., Kuklin A.I., Lee M.-K., Chang L.-J., Kumzerov Y.A., Fokin A.V.* SANS studies of the gallium–indium alloy structure within regular nanopores. // Nanomaterials. 2022. **12**, N 13. Art. № 2245.
6. *Pirozerski A.L., Charnaya E.V., Baryshnikov S.V., Nedbai A.I., Borisov B.F., Mikushev V.M., Lebedeva E.L., Khomutova A.S., Dolgova M.V.* Acoustic studies of the ferroelastic phase transition in LiCsSO4/MCM-41 nanocomposite using longitudinal ultrasonic waves. // IJAER. 2016. **11**, N 5. P. 3309.
7. *Пирозерский А. Л., Чарная Е. В., Абдуламонов Х. А., Недбай А.И., Кумзеров Ю.А., Фокин А.В., Хомутова А.С.* Акустические исследования плавления и кристаллизации эвтектических сплавов галий-серебро, внедренных в поры пористых стекол. // Акустический журнал. 2023. **69**, № 4. С. 446.
8. *Weibke F., Meisel K., Weigels L.* Das Zustandsdiagramm des systems Silber-Gallium. // Z. Anorg. Allg. Chem. 1932. **226**. P. 201.
9. *Predel B., Stein D.W.* Bildungsenthalpien binarer verbindungen des galliums mit kupfer, silber und gold sowie analyse der thermodynamischen eigenschaften von 3/2-elektronen-erbindungent. // Metallurgica. 1972. **20**. P. 681.

УДК: 534.222; 551.463; 535.211 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39496

Пороги ультразвуковой и лазерной кавитации в жидкости с включениями с различной смачиваемостью

В.А. Буланов[1,2,a], В.М. Чудновский[1,2,b]

[1]Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН

690041, Владивосток, ул. Балтийская. 43

[2]Институт прикладной математики ДВО РАН, 690041, Владивосток, ул. Радио 7

E-mail: [a]bulanov@poi.dvo.ru, [b]vm53@mail.ru

Аннотация: Обсуждена роль фазовых включений - пузырьков, посторонних твердых и мягких частиц и протяженных поверхностей с находящимися в них порами и трещинами с различной смачивостью жидкостью в качестве источников образования разрывов жидкости при внешнем акустическом или лазерном воздействии. Проанализировано влияние смачиваемости на пороги кавитации жидкостей и выявлена взаимная роль размеров и краевого угла смачиваемости отдельных включений. Обсуждено влияние гетерофазных флуктуаций на нуклеацию критических зародышей в жидкостях с включениями с различной смачиваемостью. Выявлен диапазон размеров и краевого угла смачиваемости, когда требуется учет механизма гетерофазных флуктуаций при определении порогов перегрева или кавитации. Показано, что наличие гидрофобных включений и шероховатых гидрофобных поверхностей резко понижают кавитационную прочность жидкостей. Обсуждены общие закономерности, приводящие к снижению порогов акустической кавитации и лазерной термокавитации реальных жидкостей, которые согласуются с экспериментальными результатами. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-19-00189 П)

Ключевые слова: ультразвуковая лазерная кавитация, пузырьки, смачиваемость

ULTRASONIC AND LASER CAVITATION THRESHOLDS IN LIQUIDS CONTAINING INCLUSIONS WITH DIFFERENT WETTABILITY

V.A. Bulanov[1,2,a] , V.M. Chudnovsky[1,2,b]

[1]V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of FEB RAS,

690041, Vladivostok, 43, Baltiskaya St. Russia

[2]Institute of Applied Mathematic of FEB RAS,, 690041, Vladivostok, 7, Radio St., Russia

E-mail: [a]bulanov@poi.dvo.ru, [b]vm53@mail.ru

Abstract: The paper considers the role of phase inclusions in the form of bubbles, foreign solid and soft particles, and extended surfaces containing pores and cracks with different wettability by liquid, as sources of liquid ruptures under the influence of external acoustic or laser radiation. The influence of wettability on liquid cavitation thresholds is analyzed, and the mutual role of the sizes and contact angles of individual inclusions is revealed. The influence of heterophase fluctuations on the nucleation of critical nuclei in liquids with inclusions with different wettability is discussed. The range of sizes and wetting contact angles is determined, when it is necessary to take into account the mechanism of heterophase fluctuations when determining the thresholds of superheating or cavitation. It is shown that the presence of hydrophobic inclusions and rough hydrophobic surfaces sharply reduces the intensity of liquid cavitation. General laws leading to a decrease in the thresholds of acoustic cavitation and laser thermal cavitation of real liquids are discussed, consistent with the experimental results. The work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation (project No. 22-19-00189 P).

Keywords: ultrasonic laser cavitation, bubbles, wettability.

PACS: 43.20.+y; 43.35.Ud ; 47.55.dp ; 36.40.Ei

Введение

Кавитационная прочность реальной жидкости имеет низкое значение по сравнению с чистой жидкостью и это обстоятельство обычно связывают с наличием в жидкости зародышей кавитации [1-3]. Кавитация может вызываться уменьшением давления в жидкости [1], электрическим или оптическим пробоем [2, 4, 5], динамическим или статическим нагревом [1, 6]. Кавитация, индуцированная лазерным нагревом жидких сред, составляет основу ряда новых лазерных технологий, востребованных в технических приложениях и медицине [2, 4]. В таких технологиях лазер используется для создания сосредоточенного источника тепла, в качестве которого выступает торец лазерного оптоволокна [4, 5], что приводит к вскипанию жидкости –

явление термокавитации, получившее такое название в последние годы [2, 4, 5]. Остаются актуальными вопросы оценки порогов термокавитации и ее развития при контакте с поверхностями и другими гетерогенными неоднородностями [3-7]. Цель работы – выявить общие закономерности, приводящие к снижению порогов разрыва сплошности реальных жидкостей – порогов акустической кавитации и лазерной термокавитации.

1 Пороги кавитации в гетерогенных жидкостях с пузырьками

С кавитацией связано образование пузырьков с радиусами R большими критического $R_k = 2\sigma/(P_k' - P_k)$, где σ - коэффициент поверхностного натяжения, штрихи здесь и далее относятся к пузырьку, P - давление. При наличии в жидкости достаточно больших паровых пузырьков или несмачиваемых твердых частиц радиуса R_0 можно получить приближенную формулу [1-3] $\Delta P_k \approx 2\sigma/R_0$, где $\Delta P_k = P_\sigma - P_k$ - кавитационная прочность, $P_\sigma = P_\sigma(T)$ - равновесное давление паров над плоской поверхностью при температуре T. При образовании критического пузырька в жидкости совершается минимальная работа [7], имеющая вид :

$$W = -(4/3)\pi\left(R^3 - {R_0}^3\right)\Delta P\left(1 - \rho'/\rho\right) + 4\pi\sigma\left(R^2 - {R_0}^2\right) - [4\pi a/(3-n)]\left(R^{3-n} - {R_0}^{3-n}\right), \quad (1)$$

где $a \approx (2\sigma/R_0)D{R_0}^n$, $D = 1 + (P_0 R_0/2\sigma)$, $n = 3\gamma$, γ - показатель политропы газа, $\delta P_0 = P_0 - P_\sigma \approx P_0$, P_0 - гидростатическое давление, $P_\sigma = P_\sigma(T_0) << P_0$. Из условия $dW/dR = 0$ можно получить формулу $\Delta P_k = 2\sigma/R_k - a/{R_k}^n$, а из условия $d^2W/dR^2 = 0$ - формулу $\Delta P_k = \alpha_0(2\sigma/R_0)$, где $\alpha_0 = (n-1)/\left(n^n D\right)^{1/(n-1)}$. Данный случай соответствует безактивационному образованию зародышей новой фазы. Вследствие гетерофазных флуктуаций возможен активационный переход. В этом случае количество зародышей новой фазы J, способных вырасти в единицу времени в единице объема жидкости до макроскопических размеров (с размерами $R > R_k$), определяется выражением $J = C\exp(-W_k/kT)$, где коэффициент $C \sim 10^{28} \div 10^{34}$ см$^{-3}$с$^{-1}$ [6, 7]. Обозначая $x = R_0/R_k$ и используя (1) получаем уравнение

$$(2/3)x\left(1 - Dx^{n-1}\right)\left(1 - x^{-3}\right) - 1 + x^{-2} - [2D/(n-3)]\left(1 - x^{3-n}\right) - b = 0, \quad (2)$$

позволяющее определить x при условии $R_0 << R_k$ ($x << 1$) и при $n \neq 3$ в виде $x = \left[3 + b + 6D/(n-3)\right]^{-1/2}$, где $b = 3kT\ln\left(C/J\right)/(4\pi\sigma{R_0}^2)$. Для больших газовых пузырьков $b << 1$, откуда $x = \left(3 + 2D/\left(\gamma - 1\right)\right)^{-1/2}$. В итоге можно определить ΔP_k в виде:

$$\Delta P_k = \frac{2\sigma}{R_0}\left(3+\frac{2D}{\gamma-1}\right)^{-1/2} \approx \begin{cases} \sqrt{(\gamma-1)/(3\gamma+1)}(2\sigma/R_0), & R_0 < 2\sigma/P_0 \\ \sqrt{(\gamma-1)/2}P_0(2\sigma/R_0P_0)^{3/2}, & R_0 > 2\sigma/P_0 \end{cases}. \quad (3)$$

Для жидкости с изотермическими пузырьками имеем $\Delta P_k = 0.386\left(2\sigma/R_0\right)$. В зависимости от показателя адиабаты γ При показателях адиабаты γ=7/5, 5/3, 1, 1.3, 1.5 имеем следующие величины α_f/α_0=0.70, 0.74, 0.85, 0.62, 0.64, где α_f и α_0 - суть $\alpha_k = \Delta P_k R_0/2\sigma$, рассчитанные с учетом и без учета гетерофазных флуктуаций, соответственно. Видно, что понижение ΔP_k, обусловленное гетерофазными флуктуациями, достигает 30-40%, т.е. оказывается заметно.

2 Кавитационная прочность жидкостей с взвесями с различной смачиваемостью

Смачиваемость частиц взвесей определяется краевым углом смачивания [6], меняющимся в пределах $0 \le \theta \le \pi$. Выражение для минимальной работы W образования пузырька на частице имеет вид $W = -(4/3)\pi\left(R^3 - R_0^{\,3}\right)\Delta P\left(1-\rho'/\rho\right) + 4\pi\sigma\left(R^2 + R_0^{\,2}\cos\theta\right)$. Используя соотношение между W и выражением для J, можно написать уравнение для определения ΔP_k в виде:

$$y^2 = 1 + 2x^3 + 3x^2 z, \quad y = \Delta P_k/\Delta P_{k0}, \qquad \Delta P_{k0} = \left[16\pi\sigma^3/[3kT\ln(C/J)]\right]^{1/2}, \quad (4)$$

где $z = \cos\theta$, $R_k \approx 2\sigma/\Delta P_k$, величина ΔP_{k0} - кавитационная прочность чистой жидкости [6, 7].

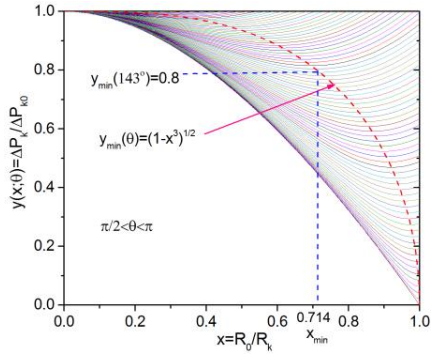


Рис.1. Зависимость $y(x;\theta)$ от $x = R_0/R_k$ при различном краевом угле смачиваемости θ взвесей в воде.

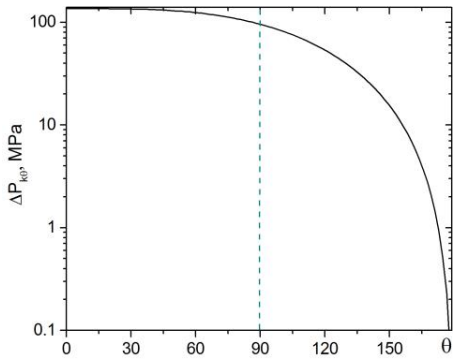


Рис.2. Зависимость кавитационной прочности воды $\Delta P_{k\theta}$ от краевого угла смачивания в случае плоской поверхности

На рис. 1 представлена зависимость относительной кавитационной прочности воды $y(x;\theta) = \Delta P_k/\Delta P_{k0}$ при различном краевом угле смачивания θ от $x = R_0/R_k$. Дифференцируя зависимость $y(x;\theta)$ по x можно получить положения минимумов функции $y(x;\theta)$ при различных углах смачиваемости θ. Соответствующая зависимость определяется формулой $y_{\min} = \sqrt{1-x^3}$ и представлена штриховой лиией на рис.1. Значения $y_{\min}$ реализуются при x,

которые связаны с углом смачивания формулой $x = -\cos\theta$. Таким образом, на кавитационную прочность жидкости наряду с размером частиц влияет еще один параметр - угол смачивания θ.

3 Кавитационная прочность жидкостей вблизи плоских и шероховатых поверхностей

Основные положения теории гетерогенной нуклеации на частично смачиваемой плоской поверхности были разработаны Дерингом и Вольмером [6]. Можно записать минимальную работу в виде $W = \left[4\pi R^2\sigma - (4/3)\pi R^3\Delta P\right]\psi(\theta)$, где $\psi(\theta) = (1/4)(1+\cos\theta)^2(2-\cos\theta)$. В итоге получаем $W_k = (16\pi\sigma^3/3\Delta P_k^{\,2})\psi(\theta)$, что позволяет определить кавитационную прочность в виде

$$\Delta P_{k\theta} = \left[16\pi\sigma^3/[3kT\ln(C/J)]\right]^{1/2}\sqrt{\psi(\theta)} = \Delta P_{k0}\sqrt{\psi(\theta)} \qquad (5)$$

На рис. 2 показана зависимость кавитационной прочности воды $\Delta P_{k\theta}$ от угла смачивания θ, которая показывает резкое понижение кавитационной прочности на границе не полностью смачиваемых плоских поверхностей. Экспериментальная проверка выявила согласие основных предсказаний теории нуклеации на смачиваемых поверхностях [3, 6].

В случае шероховатых поверхностей, имеющих углубления (поры), царапины и т.п., потенциальный барьер образования критического пузырька изменяется. Наиболее простой геометрией для рассмотрения является конус. Обозначая половину угла конуса через β, минимальную работу образования пузырька пара можно написать в виде

$$W = \left[4\pi R^2\sigma - (4/3)\pi R^3\Delta P\right]\Phi(\theta,\beta), \quad \Phi(\theta,\beta) = (1/2)[1-\sin(\theta-\beta)+\cos^2(\theta-\beta)\cos\theta/2\sin\beta]. \qquad (6)$$

Роль поверхности при нуклеации заключается в понижении потенциального барьера в связи с наличием границы, формально выражаемом в появлении функции краевого угла смачиваемости $\Phi(\theta,\beta)$. Выражение кавитационной прочности можно записать в виде

$$\Delta P_{k\theta}(\theta,\beta) = \Delta P_{k0}\sqrt{\Phi(\theta,\beta)}\,. \qquad (7)$$

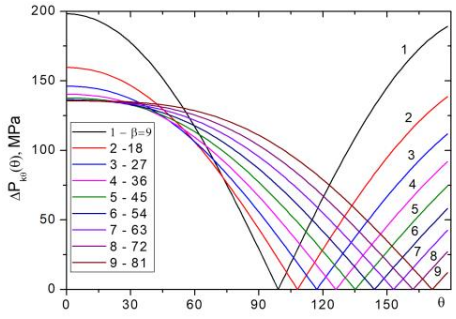


Рис. 3. Функция $\Delta P_{k\theta}(\theta;\beta)$.

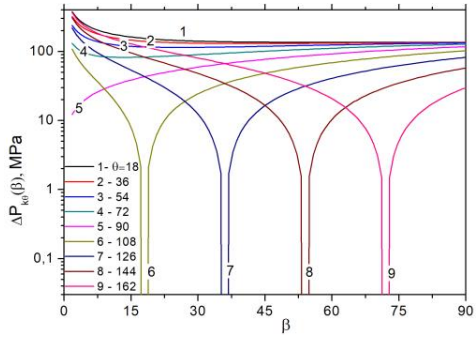


Рис. 4. Функция $\Delta P_{k\theta}(\beta;\theta)$.

На рис. 3 и рис. 4 представлена функция $\Delta P_{k\theta}(\theta,\beta)$ для шероховатой поверхности. Видно, что, в зависимости от соотношения угла смачивания θ и угла при вершине углубления β,

могут быть реализованы величины $\Delta P_{k\theta}(\theta,\beta)$ в чрезвычайно широких пределах.

Метастабильное состояние вблизи кривой фазового равновесия может быть реализовано за счет изменения температуры, например, в экспериментах по лазерной кавитации [4, 5]. Перегрев ΔT_k можно определить по формуле Клапейрона-Клаузиуса [6, 7] $\Delta T_k(\theta,\beta) \approx [T/\rho' L]\Delta P_{k\theta}(\theta,\beta)$, где L - теплота парообразования. Функция $\Delta T_k(\theta,\beta)$ с точностью до коэффициента $T/\rho' L$ повторяет приведенные выше закономерности для давления $\Delta P_{k\theta}(\theta,\beta)$.

Заключение

Показана важная роль гетерофазных флуктуаций в образовании критических зародышей в присутствии газовых пузырьков, частиц и поверхностей с различной смачиваемостью. Показано, что наличие газовых пузырьков и несмачиваемых объектов резко понижает кавитационную прочность. Особо сильный эффект наблюдается при наличии шероховатых поверхностей, имеющих гидрофобные углубления. Образование пузырьков может быть вызвано как понижением давления (разрыв жидкости), так и повышением температуры – перегрев жидкости, термокавитация. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-19-00189 П)

Список литературы

1. *Herbert E., Balibar S., Caupin F.* Cavitation pressure in water // Phys. Rev. 2006. Vol. E 74. No 041603.
2. *Padilla-Martinez J. P., Berrospe-Rodriguez C., Aguilar G., Ramirez-San-Juan J.C., Ramos-Garcia R.* Optic cavitation with CW lasers: A review // Physics of Fluids. 2014. Vol.26, No 122007.
3. *Giacomello A., Roth R.* Bubble formation in nanopores: a matter of hydrophobicity, geometry, and size // Advances in Physics: X. 2020. Vol.5. No 1, 1817780, doi: 10.1080/23746149.2020.1817780
4. *Юсупов В.И.* Особенности лазероиндуцированной термокавитации воды //Акустический журнал. 2024. Т.70. №6. С.828-837. doi: 10.31857/S0320791924060035
5. *Дац Е.П., Кудряшов А.П., Чудновский В.М.* Влияние теплофизических характеристик жидкой фазы на динамику парового пузырька в процессе лазерной кавитации // Дальневосточный математический журнал. 2025. Т. 25. № 1. С. 39–47.
6. *Скрипов В.П.* Метастабильная жидкость. М. Наука, 1972. 312 с.
7. *Акуличев В.А., Алексеев В.Н., Буланов В.А.* Периодические фазовые превращения в жидкостях. М.: Наука, 1986, 280 с.

УДК: 534 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39497

Эмпирические модели для прогнозирования акустических свойств нетканых материалов

Бикмухаметов Ф.Р.[1)]

[1)] *ООО «Деволм», Санкт-Петербург;*

Тел.: +7(965)619-0551; E-mail: bfr@devolm.ru

В данной работе представлен сравнительный анализ точности эмпирических и полуэмпирических моделей для прогнозирования акустических свойств пористых материалов применительно к нетканым изделиям из хлопка, льна и конопли. Основное внимание уделяется проверке наиболее популярных моделей: Delany-Bazley, Miki, Mechel, Garai-Pompoli, JCA. Ключевым параметром для применения этих методов является сопротивление воздушному потоку. Значение этой величины также было измерено, а позже оценено численно с помощью эмпирических формул (PadeNUP, Miki, Kozeny-Carman, Bies-Hansen, Garai-Pompoli), использующих такую характеристику, как толщина волокна материала, которая была определена с помощью микроскопа. В результате проведенного анализа экспериментальные значения импеданса, волнового числа и сопротивления воздушному потоку были сопоставлены с расчетными данными для всех моделей. По итогам работы сделаны вывод о том, какие методы прогнозирования являются наиболее точными для определения акустических свойств нетканых материалов, а также была разработана новая модель, которая демонстрирует повышенную точность и лучшую согласованность с экспериментальными данными для нетканых изделий из органических материалов.

Ключевые слова: эмпирические модели, импеданс, сопротивление воздушному потоку, шумоподавление

УДК 534.7; 534.292 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39498

Компьютерное моделирование и экспериментальное исследование ультразвуковых полей секторного фокусирующего преобразователя

И.А. Швецов[1], М.А. Луговая[1], Н.А. Швецова[1], Н.А. Колпачева[2], А.Н. Рыбянец[1,*]

[1]Южный федеральный университет, Научно-исследовательский институт физики, 344090, Ростов-на-Дону, Россия

[2]Донской государственный технический университет, 344002, Ростов-на-Дону, Россия

*E-mail: *arybyanets@gmail.com*

Аннотация: Ультразвуковые системы высокоинтенсивного фокусированного ультразвука (HIFU) широко применяются для проведения хирургических, терапевтических или косметических процедур на живых тканях. Силовые фазированные решетки, использующие метод прямого синтеза акустического поля, имеют ряд преимуществ при обработке больших объемов тканей по сравнению со своими однофокусными аналогами. В работе выполнено компьютерное моделирование и экспериментальное исследование ультразвуковых полей секторного сферического фокусирующего преобразователя в различных режимах возбуждения (подача сигналов с различной фазой или частотой на различные сектора). Расчеты и моделирование были выполнены с использованием программы Vortex, реализованной в оболочке MATLAB, позволяющей рассчитывать акустическое давление в произвольной плоскости акустического поля секторного фокусирующего преобразователя, возбуждаемого синусоидальными сигналами с произвольными частотами или фазовыми сдвигами. Экспериментальная валидация результатов моделирования выполнялась в водяной и масляной ваннах, а также на образцах биологических тканей ex vivo. В результате выполненных исследований апробирован новый метод динамической фокусировки ультразвуковых волн, основанный на прямом синтезе акустических полей сферических секторных преобразователей. Использование метода позволяет повысить эффективность теплового и кавитационного воздействия ультразвука, а также увеличить объем обрабатываемой биологической ткани.

Ключевые слова: секторный фокусирующий преобразователь, ультразвуковое поле, акустическое давление, фокальная структура, динамическая фокусировка.

Computer simulation and experimental study of ultrasonic fields of a sector focusing transducer

I.A. Shvetsov[1], M.A. Lugovaya[1], N.A. Shvetsova[1], N.A. Kolpacheva[2], A.N. Rybyanets[1,*]

[1]Research Institute of Physics, Southern Federal University, Rostov-on-Don, 344090, Russia

[2]Physics Department, Don State Technical University, Rostov-on-Don, 344002, Russia

*E-mail: *arybyanets@gmail.com*

Abstract: High-intensity focused ultrasound (HIFU) systems are widely used for surgical, therapeutic, or cosmetic procedures on living tissues. Power phased arrays employing the method of direct acoustic field synthesis offer several advantages for treating large tissue volumes compared to their single-focus counterparts. This paper presents computer modeling and experimental study of ultrasonic fields generated by a sectoral spherical focusing transducer under various excitation modes (application of signals with different phases or frequencies to different sectors). Calculations and simulations were performed using the Vortex program implemented in the MATLAB environment, which enables computation of acoustic pressure in an arbitrary plane of the acoustic field of a sectoral focusing transducer excited by sinusoidal signals with arbitrary frequencies or phase shifts. Experimental validation of the modeling results was carried out in water and oil baths, as well as on ex vivo biological tissue samples. As a result of the performed studies, a new method of dynamic focusing of ultrasonic waves was tested, based on direct synthesis of acoustic fields of spherical sectoral transducers. The application of this method allows enhancing the efficiency of thermal and cavitation effects of ultrasound, as well as increasing the volume of treated biological tissue.

Keywords: sectoral focusing transducer, ultrasonic field, acoustic pressure, focal structure, dynamic focusing.

PACS: 87.19.Xx; 87.80.−y; 43.35.Yb

Введение

Ультразвуковые методы широко применяются как для диагностики заболеваний, так и для терапевтического воздействия при лечении ряда онкологических и некоторых сердечно сосудистых заболеваний [1]. Недавние успехи в области физической акустики, визуализации и обработки изображений, пьезоэлектрических материалов и конструкций ультразвуковых

преобразователей привели к развитию традиционных и появлению новых областей применения [2].

Одним из перспективных методов ультразвуковой терапии является технология, основанная на использовании фокусированного ультразвука высокой интенсивности (HIFU) [1, 2]. Системы HIFU широко применяются для проведения хирургических, терапевтических или косметических процедур на живых тканях. Несмотря на большое количество лабораторных исследований и клинических испытаний [2, 3], практическое использование HIFU технологии имеет ряд ограничений и недостатков, связанных с расширением областей применения, а также безопасностью, селективностью и эффективностью используемых методов и устройств [4, 5]. Основными ограничениями применимости HIFU терапии является малый размер фокальной зоны, а также ограниченная доступность обрабатываемых областей, приводящие к длительному времени терапевтической процедуры, болевым эффектам и нежелательному воздействию на костные ткани и здоровые внутренние органы [5–8]. Разработка новых эффективных пьезоматериалов [9], методов формирования акустических полей и фокусировки ультразвука и их использование для терапевтической и хирургической обработки биологических тканей является актуальной задачей современной медицинской техники.

Целью настоящей работы является численное моделирование динамически фокусированных ультразвуковых полей сферически фокусирующих секторных преобразователей для различных областей ультразвуковой медицинской диагностики и терапии.

1 Метод и алгоритм расчета акустических полей секторного фокусирующего преобразователя

Для расчета акустического поля ультразвукового сферического излучателя был выбран метод Кирхгоффа [1, 10]. Предлагаемый метод позволяет вычислять звуковые поля в жидкостях без потерь, облучаемых ультразвуковым преобразователем или фазированной решеткой преобразователей при заданных соответствующих начальных и граничных условиях. В основном метод используется для непрерывного режима (CW) генерации ультразвука [11].

При рассмотрении CW режима учитываются два типа граничных условий. В первом случае распределения амплитуды и фазы нормальной компоненты скорости колебаний поверхности преобразователя T_S по поверхности служит отправной точкой для вычислений акустического давления в области пространства, представляющей интерес. Эти распределения

могут быть импортированы из внешних источников. Представленная реализация программы относится к аксиально-симметричным распределениям нормальной компоненты скорости.

Во втором случае распределение акустического давления или скорости частиц в некоторой плоскости являются исходными данными для расчета звукового поля в параллельной плоскости. Второй случай реализуется в целом быстрее, поскольку допускает использование алгоритма быстрого преобразования Фурье (FFT). Кроме того, он не требует аксиальной симметрии данных.

2 Моделирование акустических полей секторного фокусирующего преобразователя

В качестве модельной системы для реализации метода динамической фокусировки был выбран многоэлементный ультразвуковой преобразователь, представляющий собой пьезокерамический сферический сегмент, разделенный на n (n>1) регулярных секторов равной площади. Сектора одновременно возбуждались M (1<M≤n) синусоидальными сигналами с различными частотами, лежащими в акустической полосе пропускания (6 дБ) ультразвукового преобразователя.

Расчеты и моделирование структуры акустического поля для различных конфигураций секторов и наборов частот были выполнены с использованием метода, описанного в разделе 1 и программы Vortex, реализованной в оболочке MATLAB, позволяющей рассчитывать акустическое давление в произвольной плоскости акустического поля фокусирующего преобразователя с апертурой D и радиусом кривизны R. Результат перекрытия акустических пучков с различными частотами в фокальной плоскости (биение частот), излучаемых отдельными секторами, является эквивалентом непрерывного изменения фазового сдвига возбуждающих сигналов на секторах в соответствие со следующей формулой $\varphi_i = F(f_n)$, где φ_i – фазовый сдвиг на секторе i, f_n – частота сигнала, подаваемая на сектор n.

Примеры распределения акустического давления в фокальной плоскости динамически фокусирующего преобразователя с четырьмя регулярными секторами показаны на рисунке 1 (протокол возбуждения 4 секторов: f_1 = 700 кГц, f_2 = 690 кГц, f_3 = 700 кГц, f_4 = 690 кГц, частота повторения фокальных структур – общий делитель использованных частот 10 кГц).

Приведенные распределения акустического давления в фокальной плоскости демонстрируют основные преимущества метода динамической фокусировки – расширение фокальной зоны в поперечном направлении и циклическое повторение различных фокальных структур с необходимой частотой повторения.

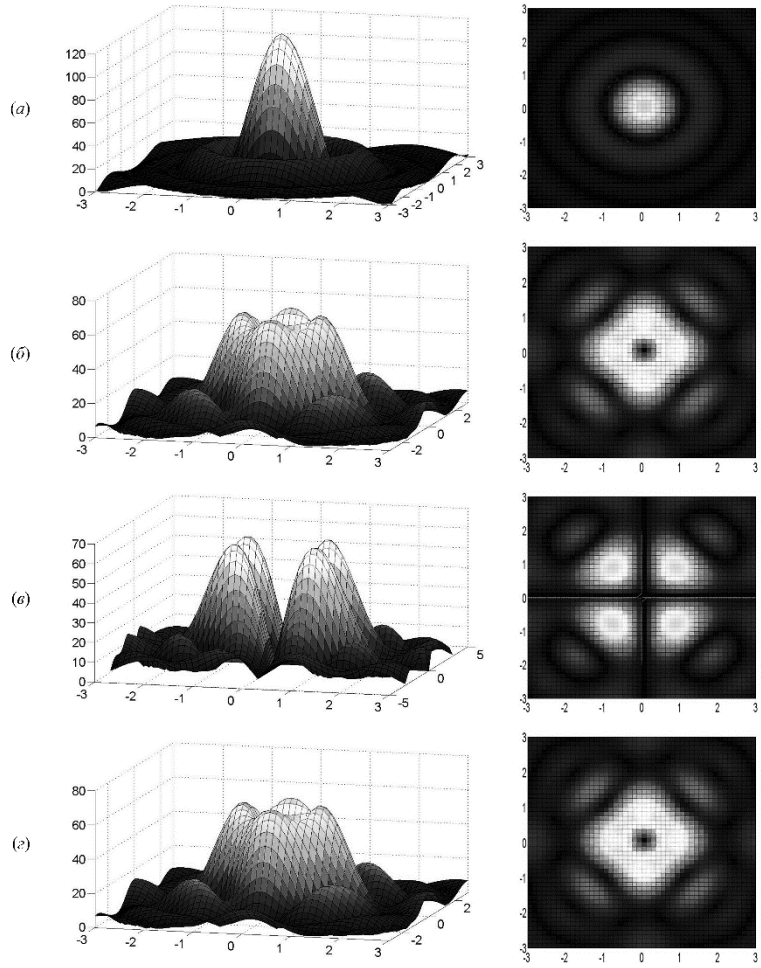


Рис. 1. Последовательные структуры фокальных зон секторного динамически фокусирующего преобразователя. Соответствующие фазовые сдвиги для соседних секторов: (*а*) $\varphi = 0^{o}$; (*б*) $\varphi = 90^{o}$; (*в*) $\varphi = 180^{o}$; (*г*) $\varphi = 270^{o}$.

Заключение

В результате выполненных исследований разработан новый метод динамической фокусировки ультразвука высокой интенсивности, основанный на прямом синтезе акустических полей сферических секторных преобразователей. Метод заключается в последовательной непрерывной циклической генерации фокальных структур с определенным размером, формой и/или положением при оптимальной частоте повторения и уровне ультразвуковой энергии, достаточном для создания и поддержания нестабильной кавитации и/или теплового воздействия в каждой фокальной зоне. Разработанный метод обеспечивает расширение фокальной зоны в поперечном направлении, неоднородную динамическую структуру акустического поля и циклическое повторение различных фокальных структур с оптимальной частотой повторения.

Использование метода динамической фокусировки позволяет повысить эффективность теплового и кавитационного воздействия ультразвука, а также увеличить объем обрабатываемой биологической ткани. Разработанный метод может быть использован для

неинвазивного удаления и гипертермии злокачественных образований, лечения целлюлита, удаления жировых отложений и других медицинских ультразвуковых применений.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-72-10128, https://rscf.ru/project/24-72-10128/ в Южном федеральном университете.

Список литературы

1. *Хилл К., Бэмбер Дж., Хаар Г.* Ультразвук в медицине. Физические основы применения. Пер.с англ. Изд. 2, перераб., доп. Физматлит. М., 2008. 544 с.

2. *Haar G.R.* Therapeutic applications of ultrasound // Prog. Biophys. Mol. Biol. 2007. **93**. P. 111.

3. *Dogra V.S., Zhang M., Shweta B.* High-Intensity Focused Ultrasound (HIFU) Therapy Applications // Ultrasound Clinics. 2009. **4**. P. 307.

4. *Summer W., Patrick M.K*. Ultrasonic Therapy – A Textbook for Physiotherapists. Elsevier. London, 1964.

5. Biological Effects of Ultrasound: Mechanisms and Clinical Implications, NCRP Report #74. National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP). 1983.

6. *Rybyanets A.N., Naumenko A.A.* New combinational method for noninvasive treatments of superficial tissues for body aesthetics applications // Physics procedia. 2015. **70**. P. 1148.

7. *Rybyanets A.N., Naumenko A.A., Sapozhnikov O.A., Khokhlova V.A.* New method and transducer designs for ultrasonic diagnostics and therapy // Physics procedia. 2015. **70**. P. 1152.

8. *Rybyanets A.N., Shvetsova N.A., Shvetsov I.A., Sapozhnikov O.A., Khokhlova V.A.* Theoretical Calculations and Numerical Modeling of High Intensity Ultrasonic Fields for Optimization of High Intensity Focused Ultrasound Transducers // Indian Journal of Science and Technology. 2016. **9**, N 42. P. 342.

9. *Shvetsov I.A., Shvetsova N.A., Reznitchenko A.N., Rybyanets A.N*. New Methods of Complex Therapeutic Treatment and Accelerated Regeneration of Superficial Tissues of a Patient // In "Advanced Materials - Techniques, Physics, Mechanics and Applications". Springer Proceedings in Physics. NY, 2017. P. 489.

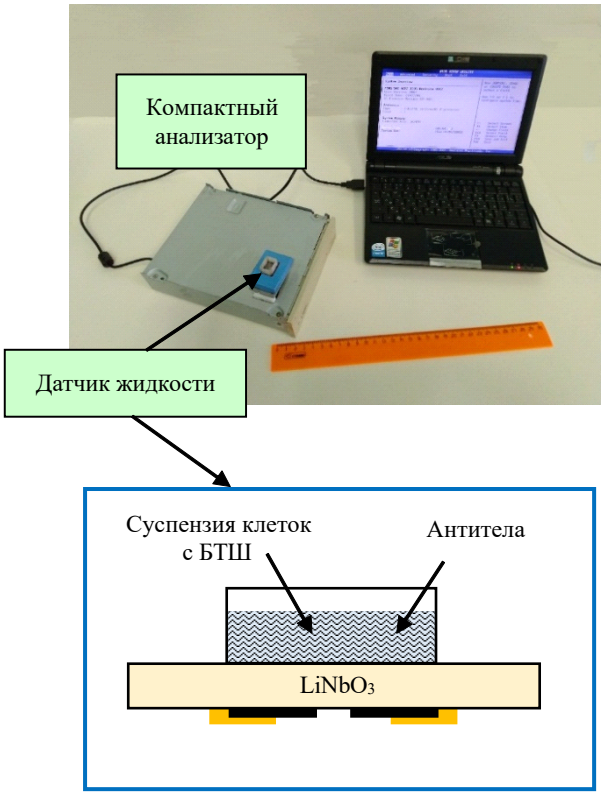
10. *Розенберг Л.Д*. Источники мощного ультразвука. Наука. М., 1967. 380 с.

11. *Goland V., Kushkuley L., Mimran S., Zadok Y., Ben-Ezra S., Shalgi A., Rybianets A.* Experimental and theoretical study of strongly focused high intensity ultrasound // IEEE Ultrasonics Symposium. 2007. P. 1305.

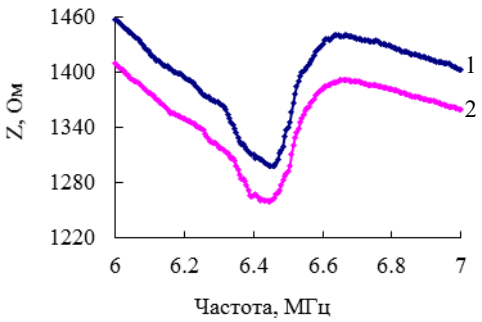
Назад к содержанию секции

СЕКЦИЯ АКУСТОЭЛЕКТРОНИКА

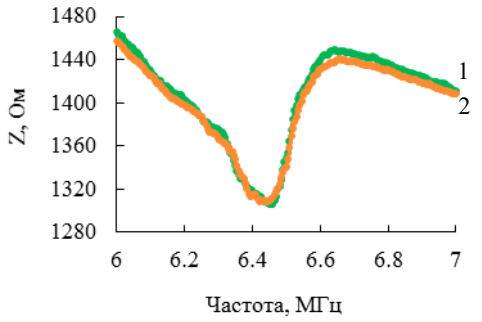
а



б



в



назад к Содержанию

СОДЕРЖАНИЕ СЕКЦИИ АКУСТОЭЛЕКТРОНИКА

1. НАРУШЕНИЕ ЛИНЕЙНОЙ ДИСПЕРСИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В СИСТЕМЕ ТОНКИЙ СЛОЙ АДСОРБИРОВАННОЙ ВОДЫ – НИОБАТ ЛИТИЯ
Симаков И.Г., Гулгенов Ч.Ж., Базарова С.Б., Артемьева К.В. 375

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ МЕТОДА ЛИНЕЙНОГО ДИСКРИМИНАНТНОГО АНАЛИЗА ЩЕЛЕВОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ МОДЫ В ПЛАСТИНАХ НИОБАТА ЛИТИЯ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ ЖИДКОСТЕЙ
Теплых А.А., Зайцев Б.Д., Семёнов А.П., Бородина И.А. 381

3. МНОГОМОДОВЫЕ АКУСТИЧЕСКИЕ СЕНСОРЫ И СЕНСОРНЫЕ РЕШЕТКИ
Анисимкин В.И.....387

4. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ И НОРМАЛЬНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В СЛОИСТЫХ СТРУКТУРАХ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПЛЕНКА НА НЕПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОМ КРЕМНИИ
Воронова Н.В. 389

5. АКУСТОЭЛЕКТРОННЫЕ СЕНСОРЫ НА ОСНОВЕ УПОРЯДОЧЕННЫХ ПЛЕНОК ЛЕНГМЮРА-БЛОДЖЕТТ
Горбачев И.А, Смирнов А.В., Кузнецова И.Е., Колесов В.В., Анисимкин В.И. Ягодин А.В., Мартынов А.Г., Горбунова Ю.Г. 391

6. ДИФРАКЦИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА КРИСТАЛЛЕ НИОБАТА ЛИТИЯ, ПРОМОДУЛИРОВАННОГО ПОВЕРХНОСТНОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ВОЛНОЙ
Иржак Д.В., Куманяев С.Е., Пундиков К.С., Рощупкин Д.В., Фахртдинов Р.Р. 393

7. СВОЙСТВА STW ВОЛН В КВАРЦЕ И ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ФИЛЬТРЫ НА ИХ ОСНОВЕ
Дорофеева С.С., Синицына Т.В. 399

8. ПОВЫШЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЯ ПРОВОДИМОСТИ ЖИДКОСТИ НА ОСНОВЕ РЕЗОНАТОРА С ПОПЕРЕЧНЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ
Зайцев Б.Д., Бородина И.А., Теплых А.А., Семёнов А.П. 405

9. ИЗМЕНЕНИЕ СПЕКТРА КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ КРИСТАЛЛА ТАНТАЛАТА ЛИТИЯ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПОВЕРХНОСТНОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ
Иржак А.В., Иржак Д.В., Пундиков К.С.....411

10. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ДОПУСТИМОЙ ВХОДНОЙ МОЩНОСТИ ФИЛЬТРОВ НА ПАВ
Машинин М.О., Груздев А.С. 417

11. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТАНТАЛАТА ЛИТИЯ
Широков В.Б., Тимошенко П.Е., Калинчук В.В. 423

12. ГИБРИДИЗАЦИЯ ПРЯМЫХ И ОБРАТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В СЛОИСТЫХ СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ XY-ПЛАСТИНЫ ПАРАТЕЛЛУРИТА И ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНОК НИОБАТА ЛИТИЯ И ЦИРКОНАТА-ТИТАНАТА СВИНЦА
Дацук Е.Р., Смирнов А.В., Кузнецова И.Е. 429

13. ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ СЛОИСТОЙ СТРУКТУРЫ TeO2 – ZnO ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В АКУСТОЭЛЕКТРОНИКЕ
Анисимкин В.И., Писаревский Ю.В., Голованов Е.В., Дацук Е.Р., Кашин В.В., Колесов В.В., Кузнецова И.Е., Смирнов А.В., Фионов А.С. 431

14. ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ЖИДКОСТЕЙ И ПРОЦЕССА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ФУЛЛЕРИТА С ПОМОЩЬЮ СВЧ АКУСТОЭЛЕКТРОННОГО СЕНСОРА НА АЛМАЗНОЙ ПОДЛОЖКЕ
Яшин Д.В., Сорокин Б.П. 433

15. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА АКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КИСЛОТНЫХ И ЩЕЛОЧНЫХ ЭЛЕКТРОЛИТОВ
Шамсутдинова Е., Анисимкин В.И., Кузнецова И.Е., Колесов В.В. 435

16. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЩЕЛЕВОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ МОДЫ
Семёнов А.П., Зайцев Б.Д., Теплых А.А., Бородина И.А. 436

17. АКУСТИЧЕСКАЯ СЕНСОРНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ИНДИКАЦИИ ОНКОЛОГИЧЕСКИХ КЛЕТОК С ЛОКАЛИЗОВАННЫМИ НА НИХ БЕЛКАМИ ТЕПЛОВОГО ШОКА В ПРОВОДЯЩИХ СУСПЕНЗИЯХ
Бородина И.А., Зайцев Б.Д., Теплых А.А., Староверов С.А., Гулий О.И. 442

18. НОВЫЙ ТИП ИЗОБРАЖЕНИЯ РЕНТГОНОВСКОЙ ДИФРАКЦИИ МОДУДИРОВАННОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ВОЛНОЙ
Рощупкин Д.В., Иржак Д.В., Куманяев С.Е., Фахртдинов Р.Р., Пундиков К.С. 448

19. ВЛИЯНИЕ ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ НА СВОЙСТВА ОБРАТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В ПЛАСТИНЕ НИОБАТА ЛИТИЯ
Смирнов А.В., Недоспасов И.А., Кузнецова И.Е. 455

20. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН, РАСПРОСТРАНЯЮЩИХСЯ В СЛОИСТЫХ СТРУКТУРАХ TeO2-ZnO И TeO2-Ni-ZnO, К БИОЛОГИЧЕСКИМ ИЛИ ВЯЗКИМ ЖИДКОСТЯМ
Кузнецова И.Е., Колесов В.В., Анисимкин В.И., Агейкин Н. А., Дацук Е.Р. 457

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39499

Нарушение линейной дисперсии поверхностных акустических волн в системе тонкий слой адсорбированной воды – ниобат лития

И.Г. Симаков[a], Ч.Ж. Гулгенов[b], С.Б. Базарова[c], К.В. Артемьева[d]

[1] *Институт физического материаловедения СО РАН.*

Россия, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахъяновой, д. 6.

E-mail: [a]sigfizik@mail.ru, [b]chingisbarga@gmail.com, [c]baz_say@mail.ru, [d]kuzneczova-kseniya@mail.ru

Проведены исследования дисперсии поверхностных акустических волн (ПАВ) в системе «тонкий слой адсорбированной воды – ниобат лития», в которой толщина слоя зависит от степени влажности. Показано, что изменение скорости ПАВ в зависимости от давления пара при постоянной температуре имеет нелинейный характер, определяемый изотермой адсорбции $h\,(p/p_s)_T$. Для малых по сравнению с длиной поверхностной волны λ значений толщины h жидкого слоя на поверхности пьезоэлектрического звукопровода справедлива линейная дисперсия ПАВ, т.е. $\Delta V/V \propto h/\lambda$ при условии $h << \lambda$. Коэффициент пропорциональности включает два слагаемых: 1) учитывает акустические параметры, 2) – электрические параметры. Показано, что в исследованной слоистой системе наблюдается нарушение линейной дисперсии скорости ПАВ при постоянной толщине жидкого слоя. Это нарушение проявляется как уменьшение коэффициента пропорциональности в некотором диапазоне значений нормализованной толщины адсорбционного слоя h/λ. Численные оценки показали, что изменение акустических параметров по мере роста толщины адсорбционного слоя приводит только к незначительному увеличению коэффициента пропорциональности. Наблюдаемая аномальная дисперсия ПАВ возможна только как следствие проявления частотной зависимости диэлектрической проницаемости адсорбированной воды. Характер экспериментально изученного изменения скорости ПАВ от нормализованной толщины адсорбционного слоя воды, кроме частотной зависимости ее физических свойств, свидетельствует о наличии в слоистой структуре релаксационного процесса.

Ключевые слова: поверхностные акустические волны, адсорбированная вода, ниобат лития, изотерма адсорбции, диэлектрическая проницаемость, аномальная дисперсия, слоистая структура

Violation of Linear Dispersion of Surface Acoustic Waves in a Thin Adsorbed Water Layer – Lithium Niobate System

I.G. Simakov[a], Ch.Zh. Gulgenov[b], S.B. Bazarova[c], K.V. Artemyeva[d]

[1] *Laboratory of Molecular Structures Physics Institute of Physical Materials Science of the SB RAS. Ulan-Ude, 670047, Russia.*

E-mail: [a]*sigfizik@mail.ru*, [b]*chingisbarga@gmail.com*, [c]*baz_say@mail.ru*, [d]*kuzneczova-kseniya@mail.ru*

Abstract: The dispersion of surface acoustic waves (SAW) in the system "a thin layer of adsorbed water – lithium niobate," in which the layer thickness depends on the humidity level, has been studied. It is shown that the change in SAW velocity as a function of vapor pressure at a constant temperature is nonlinear and is determined by the adsorption isotherm $h\,(p/p_s)_T$. For values of the liquid layer thickness h on the surface of a piezoelectric sound conductor that are small compared to the surface wavelength λ, linear SAW dispersion holds, i.e., $\Delta V/V \propto h/\lambda$ under the condition $h \ll \lambda$. The proportionality coefficient includes two terms: (1) accounting for acoustic parameters, and (2) accounting for electrical parameters. It is shown that in the studied layered system, a violation of linear SAW velocity dispersion is observed at a constant liquid layer thickness. This violation manifests itself as a decrease in the proportionality coefficient over a certain range of values of the normalized thickness of the adsorption layer h/λ. Numerical estimates show that changes in acoustic parameters with increasing adsorption layer thickness lead only to a slight increase in the proportionality coefficient. The observed anomalous SAW dispersion is possible only as a consequence of the frequency dependence of the permittivity of adsorbed water. The nature of the experimentally studied change in SAW velocity as a function of the normalized thickness of the water adsorption layer, in addition to the frequency dependence of its physical properties, indicates the presence of a relaxation process in the layered structure.

Keywords: surface acoustic waves, adsorbed water, lithium niobate, adsorption isotherm, permittivity, anomalous dispersion, layered structure

PACS: 3.58.−e

Введение

Вода, адсорбированная на поверхности твёрдого тела, обладает физико-химическими свойствами, существенно отличающимися от свойств объёмной жидкости. Это обстоятельство необходимо учитывать во многих природных и технологических процессах.

При изменении условий адсорбции (давление пара, температура адсорбента и степень его гидрофильности) изменяется толщина адсорбционного слоя. Адсорбирующая подложка и адсорбционный слой образуют слоистую систему, что позволяет использовать ПАВ для исследования модификации свойств адсорбированной воды.

Акустоэлектрический метод при адсорбции молекул воды на поверхность пьезоэлектрического звукопровода позволяет контролировать как акустические, так и диэлектрические свойства. Особый интерес вызывает нарушение линейной дисперсии ПАВ, наблюдаемое в системе «адсорбированная вода – ниобат лития» при фиксированной толщине слоя и указывающее на частотную зависимость диэлектрической проницаемости межфазной воды, что может быть обусловлено изменением времени релаксации под влиянием твёрдой поверхности.

Стандартным акустоэлектрическим методом исследования физических свойств жидкости в слоистой системе является изучение зависимости относительного изменения скорости и затухания ПАВ от соответствующего параметра (температуры, частоты, толщины слоя и пр.). Дисперсию параметров ПАВ можно оценить, измеряя величину изменения скорости и затухания при вариации нормализованной толщины жидкого слоя (h / λ). В случае воды, адсорбированной на гидрофильной поверхности, вариация толщины адсорбционного слоя обеспечивается соответствующим изменением давления пара (p/p_s).

1 Дисперсия ПАВ в системе «пьезоэлектрический звукопровод – слой жидкости»

Взаимодействие ПАВ со слоем жидкости приводит к уменьшению фазовой скорости и сопровождается потерями на вязкое трение, что обуславливает их затухание. Толщина слоя адсорбированной жидкости мала по сравнению с длиной поверхностной волны ($h << \lambda$), что позволяет аддитивно учитывать механическую A и электрическую B природу возмущений распространения ПАВ. Условие малости толщины слоя позволило получить простое аналитическое выражение, описывающее зависимость относительного изменения скорости ПАВ от нормализованной толщины слоя h / λ [1]:

$$\frac{V_0 - V_s}{V_0} = \left(\frac{\rho_f}{\rho_s} \sqrt{1 - \frac{V_f^2}{V_s^2}} + \frac{\pi K^2 \varepsilon_p \cdot \varepsilon'}{(\varepsilon_p + 1)^2} \right) \cdot \frac{h}{\lambda} = (A + B) \cdot \frac{h}{\lambda}, \qquad (1)$$

Здесь ε' – действительная часть диэлектрической проницаемости жидкости, ε_p – диэлектрическая проницаемость пьезоэлектрика, V_f – скорость звука в жидкости, V_0 – скорость поверхностной волны на свободной поверхности, V_s – скорость поверхностной волны в слоистой системе, K – коэффициент электромеханической связи, ρ_f и ρ_s – плотности жидкости и твердого тела, h – толщина жидкого слоя, λ – длина поверхностной волны.

Из уравнения (1) следует, что относительное изменение фазовой скорости ПАВ пропорционально толщине жидкого слоя ($\Delta V/V \sim h$) и пропорционально частоте поверхностных волн ($\Delta V/V \sim f \sim 1/\lambda$).

2 Экспериментальная установка и измерительная ячейка

Для регистрации изменений скорости ПАВ используется экспериментальная установка (рисунок 1), включающая, кроме стандартных приборов, измерительную ячейку. Схема возбуждения содержит высокочастотный генератор и излучающий ПАВ-преобразователь встречно-штыревого типа. Генератор со встроенным аттенюатором обеспечивает режим непрерывной генерации и импульсной модуляции. Приемно-регистрирующая система содержит приемный ПАВ-преобразователь, широкополосный усилитель, стробирующее устройство и осциллограф. Генератор импульсов обеспечивает режим импульсной модуляции ВЧ-генератора, а также синхронизацию осциллографа и стробирующего устройства.

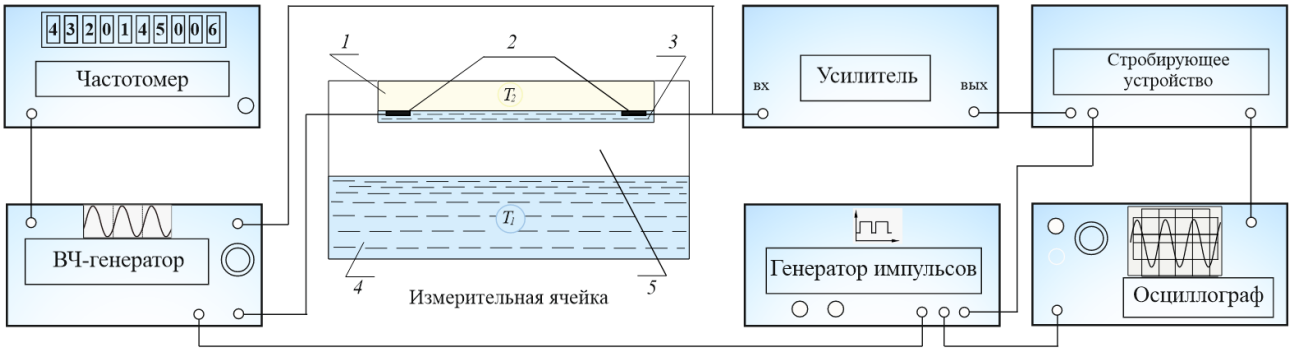


Рисунок 1
Блок-схема экспериментальной установки для измерения диэлектрических характеристик адсорбированной воды.
Схема измерительной ячейки: *1* – ниобат лития, *2* – встречно-штыревые преобразователи,
3 – слой адсорбированной воды, *4* – бидистиллированная вода, *5* – парогазовая среда

Измерительная ячейка обеспечивает контроль давления пара в зоне адсорбции, стабильность температуры и толщины адсорбционного слоя. В качестве подложки использован кристалл ниобата лития *YZ*-среза (*1*) с оптически полированной рабочей поверхностью (20×10×1.5 мм). На поверхности подложки методом фотолитографии сформированы два встречно-штыревых преобразователя (ВШП) (*2*). Адсорбция молекул воды происходит на участке рабочей поверхности между излучающим и приёмным ВШП (*3*). Подложка помещена в герметичный термостатированный объём над поверхностью бидистиллированной воды (*4*). Толщина адсорбционного слоя определяется давлением пара в зоне адсорбции (*5*), температурой и состоянием адсорбирующей поверхности. Необходимое давление пара в зоне адсорбции задается разностью температур парообразующей жидкости (воды) T_1 и адсорбирующей поверхности (T_2). Температура адсорбирующей поверхности поддерживалась постоянной (293 К). Для вычисления

величины относительного давления пара в зоне адсорбции можно воспользоваться уравнением Клапейрона – Клаузиуса [1]. Формирование адсорбционного слоя приводит к изменению условий распространения ПАВ и как следствие – изменение затухания и скорости ПАВ. Регистрация изменений скорости ПАВ под действием адсорбционного слоя (в результате адсорбции паров воды на поверхности звукопровода) производилось интерференционным методом [2].

3 Результаты и обсуждение

Зависимость относительного изменения скорости $\Delta V/V_0 = (V_s - V_0)/V_0$ ПАВ от частоты f представлена на рисунке 2. Пунктирные линии – результаты расчетов по уравнению (1) с использованием табличных значений акустических и диэлектрических параметров объемной воды и ниобата лития при температуре 293 К и атмосферном давлении (ρ_f = 998.2 кг/м^3; ρ_s = 4640.1 кг/м^3; V_f = 1483 м/с; V_0 = 3485 м/с; ε_f = 79.23; ε_p = 50.2). Сплошные линии – экспериментальные данные.

Для слоя воды толщиной h, обладающего объемными свойствами, коэффициент пропорциональности ($A + B$) в диапазоне частот ПАВ (40 – 400 МГц) остается постоянным. При этом относительное изменение скорости $\Delta V/V_0$ линейно зависит от нормированной толщины слоя (h/λ), что соответствует линейной дисперсии (пунктирные линии на рисунке 2). Однако экспериментальные данные (сплошные линии) показывают нарушение линейной дисперсии. Причиной этого нарушения может быть слагаемое A. Частотно-зависимым параметром в слагаемом A может быть скорость звука в жидкости V_f. Однако, эта скорость изменяется только на высоких частотах – в области вязкоупругой релаксации. Согласно исследованию Чураева Н.В. [3] отличие плотности граничной от объемной воды не превышает 1%. При этом значение коэффициента пропорциональности A мало зависит от изменений скорости звука. Для объемной воды при T = 293 К коэффициент A = 0.19468. Для адсорбированной воды при уплотнении ρ_f на 1%, скорость звука V_f изменится на 2.87 % [1]. При этом слагаемое A' = 0.19536. Сравнение A и A' показывает: использование данных для объёмной воды при расчёте коэффициента A вносит погрешность, не превышающую 0.35%, что не позволяет объяснить наблюдаемое нарушение дисперсии.

Таким образом, существенное отклонение $\Delta V/V_0$ от линейной зависимости при взаимодействии ПАВ с адсорбированной водой может быть обусловлено только уменьшением электрической составляющей B. Зависящим от частоты параметром в слагаемом B является диэлектрическая проницаемость ε_f, изменение которой в результате диэлектрической релаксации приводит к частотной зависимости коэффициента пропорциональности ($A + B$).

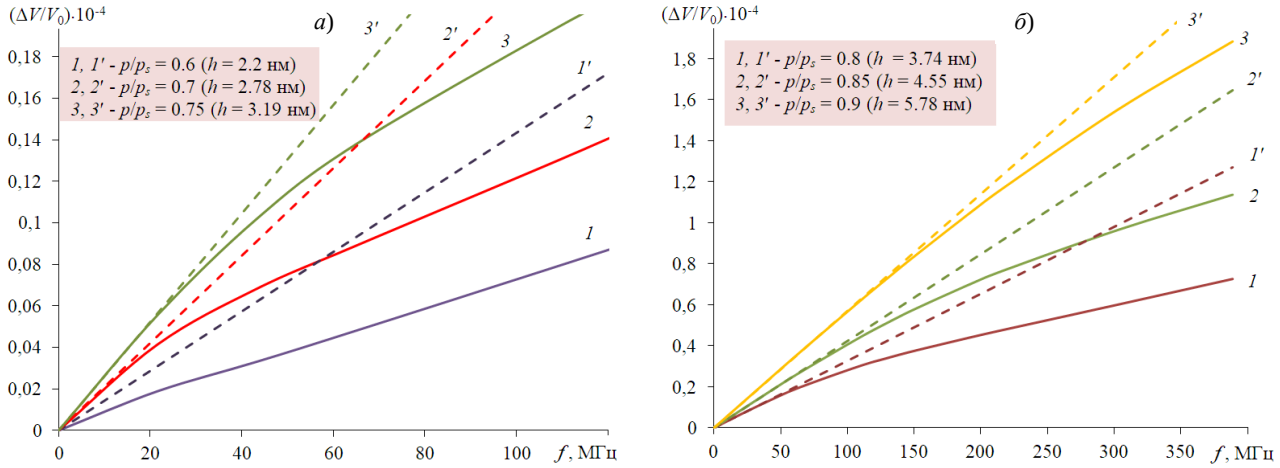


Рисунок 2 – Нарушение линейной дисперсии ПАВ при фиксированных значениях толщины адсорбционного слоя

Следовательно, при распространении ПАВ в системе «пар – адсорбированная вода – ниобат лития» с фиксированной толщиной слоя имеет место нарушение линейной дисперсии изменения скорости ПАВ, которое проявляется в частотной зависимости коэффициента пропорциональности ($A + B$). Нарушение линейной дисперсии ПАВ может быть обусловлено особенностями диэлектрической релаксации в адсорбированной воде (межфазной воде), связанное со значительным изменением времени релаксации под влиянием твердой поверхности.

Список литературы

1. *Симаков И.Г., Гулгенов Ч.Ж.* Акустоэлектрические методы исследования жидкостей в граничной фазе. Изд-во СО РАН, Новосибирск, 2019.

2. *Симаков И.Г., Гулгенов Ч.Ж.* Регистрация изменения амплитуды и скорости рэлеевских волн на поверхности пьезоэлектрика // Вестник Бурятского государственного университета. Химия. Физика. 2011. № 3. С. 216.

3. *Чураев Н.В.* Тонкие слои жидкостей // Коллоидный журнал. 1996. – Т. 58, № **6**. С.725.

УДК: 534.231.3 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39500

Исследование применимости метода линейного дискриминантного анализа щелевой акустической моды в пластинах ниобата лития для классификации жидкостей

А. А. Теплых, Б. Д. Зайцев, А. П. Семёнов, И. А. Бородина

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Саратовский филиал, Россия, 410019, г. Саратов, ул. Зеленая 38

E-mail: teplykhaa@mail.ru

В статье исследуются теоретические аспекты применения метода линейного дискриминантного анализа для цели идентификации жидкостей. Методом конечных элементов была смоделирована структура: линия задержки - воздушный зазор - пьезорезонатор - жидкость. Были рассчитаны частотные зависимости полных потерь (параметр S_{21}). Как было показано ранее, в такой структуре могут возникать пики затухания, конкретные частоты и глубины которых зависят от свойств жидкости. Линия задержки представляла собой пластину Y-X ниобата лития толщиной 350 мкм, резонатор был изготовлен из Y-X–140º ниобата лития толщиной 500 мкм, зазор между ними составлял 10 мкм. Размер резонатора в направлении распространения волны и длина акустической ячейки была равна 20 мм, толщина слоя жидкости в ячейке изменялась в пределах 0.5 – 5 мм. Моделирование показало, что в данной структуре наблюдаются 6 пиков затухания в частотном диапазоне 1.4 – 2.2 МГц. Плотность, диэлектрическая проницаемость и скорость звука в жидкости соответствовали дистиллированной воде, её проводимость изменялась в диапазоне 1 – 10000 мкСм/см, а вязкость изменялась в диапазоне 1 – 1000 мПа*с. Методом линейного дискриминантного анализа был рассчитан линейный классификатор, при помощи которого векторы признаков для каждой жидкости были отображены на плоскость. При этом жидкости с близкими параметрами сформировали компактные кластеры. Была исследована устойчивость этих кластеров к случайным изменениям исследуемых свойств жидкости и других параметров модели.

Ключевые слова: акустическая линия задержки, щелевая мода, метод конечных элементов, S-параметры, метод линейного дискриминантного анализа

PACS: 43.20+g

Study of the applicability of the method of linear discriminant analysis of the slot acoustic mode in lithium niobate plates for classification of liquids

A.A. Teplykh, B.D. Zaitsev, A.P. Semyonov, I.A. Borodina

Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics, Russian Academy of Sciences

Saratov Branch. Saratov 410019, Russia.

E-mail: teplykhaa@mail.ru

Abstract: This article explores the theoretical aspects of applying the linear discriminant analysis method to liquid identification. The following structure was modeled using the finite element method: delay line – air gap – piezoelectric resonator – liquid. The frequency dependences of the total losses (parameter S_{21}) were calculated. As shown previously, attenuation peaks can occur in such a structure, the specific frequencies and depths of which depend on the properties of the liquid. The delay line was a 350 μm-thick Y-X lithium niobate plate, the resonator was made of 500 μm-thick Y-X–140º lithium niobate, and the gap between them was 10 μm. The resonator size in the direction of wave propagation and the length of the acoustic cell were equal to 20 mm, the thickness of the liquid layer in the cell varied within the range of 0.5 – 5 mm. Modeling showed that this structure exhibits 6 attenuation peaks in the frequency range of 1.4 – 2.2 MHz. The density, permittivity, and speed of sound in the liquid corresponded to those of distilled water. Its conductivity varied from 1 to 10,000 μS/cm, and its viscosity varied from 1 to 1,000 mPa*s. Using linear discriminant analysis, a linear classifier was calculated, which mapped the feature vectors for each liquid onto a plane. Liquids with similar parameters formed compact clusters. The stability of these clusters to random variations in the studied liquid properties and other model parameters was studied.

Keywords: acoustic delay line, slot mode, finite element method, S-parameters, linear discriminant analysis method

Введение

К настоящему времени хорошо известны работы по исследованию акустических щелевых волн в полубесконечных пьезоэлектрических средах [1, 2, 3] и в пьезоэлектрических пластинах [4], разделенных вакуумным или воздушным зазором. Ранее было показано, что щелевая акустическая мода, возбуждаемая в структуре состоящей из линии задержки, резонирующей пьезопластины и жидкости может быть использована для цели определения вязкости и проводимости жидкости [5, 6]. Кроме того, в последние десятилетия стали широко развиваться численные методы математического анализа [7, 8]. Для успешного решения задачи классификации необходимо разделить множество образцов на классы. При этом существует конечное количество образцов, принадлежность которых к

классам известна (обучающая выборка), а классовая принадлежность остальных образцов неизвестна и её необходимо определить. Для решения этой задачи для вязких и проводящих жидкостей в работе нами применяется метод линейного дискриминантного анализа (Linear Discriminant Analysis, LDA). Идея заключается в том, что, в многомерном пространстве можно определить такие направления степеней свободы, для которых точки, соответствующие результатам измерений образцов с близкими параметрами, будут расположены в этом пространстве ближе друг к другу, чем точки для образцов с сильно различающимися параметрами.

1. Методика расчета

В работе [6] описана методика расчета щелевой акустической моды, возникающей в структуре из двух пьезоэлектрических пластин ниобата лития, разделенных тонким воздушным зазором. В данной работе к этой структуре добавлена жидкостная ячейка, содержащая жидкость с определенной конечной сдвиговой вязкостью η и электрической проводимостью σ. В результате расчета получается частотная зависимость параметра S_{21} для жидкости с заданными параметрами.

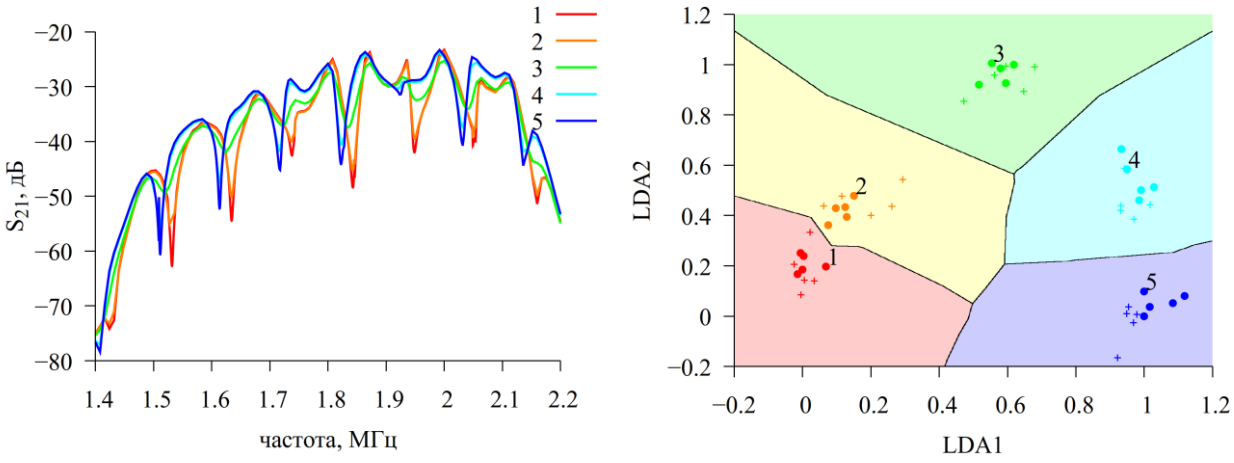
На основе результатов этих расчетов была проведена проверка метода идентификации жидкостей с различной вязкостью и электрической проводимостью при помощи метода линейного дискриминантного анализа. Как показали расчеты (рис. 1а, рис. 2а), для данной комбинации линии задержки, резонатора и жидкостей наблюдаются 6 пиков затухания в частотном диапазоне 1.4 – 2.2 МГц. При этом глубина и частота каждого пика затухания определенным образом зависит от характеристик жидкости, находящейся в жидкостной ячейке. Метод линейного дискриминантного анализа [1] применялся следующим образом. Каждое измерение щелевой моды с ячейкой, заполненной определенной жидкостью, позволяет нам определить вектор из 12 чисел a_i, i = 1..12, а именно, число a_{2j-1} соответствует частоте пика затухания под номером j = 1..6 (в мегагерцах), а число a_{2j} соответствует абсолютному значению логарифма вносимых потерь на этой частоте (в децибелах). Этот вектор называется вектором признаков образца и представляет собой точку в 12-мерном пространстве признаков. Его можно назвать сигнатурой или цифровым портретом для данного конкретного результата измерения образца жидкости. Мы предполагаем, что точки, соответствующие результатам измерений образцов с близкими параметрами (проводимостью и вязкостью), будут расположены в этом пространстве ближе друг к другу, чем точки для образцов с сильно различающимися параметрами. Однако непосредственно проверить эту гипотезу затруднительно, т.к. пространство признаков имеет высокую размерность. Для решения задачи классификации образцов, т.е. отнесения конкретного образца к классу жидкостей с определенной вязкостью, в данной работе был применен хорошо известный

статистический метод линейного дискриминантного анализа [8]. Этот метод позволяет находить такую линейную комбинацию используемых признаков, которая наилучшим образом разделяет классы исследуемых объектов. Это означает, что данная комбинация может быть использована как линейный классификатор образцов жидкости. Задача классификации решалась следующим образом. Вначале был проведен расчет частотной зависимости вносимых потерь для свободной линии задержки (без верхней акустической ячейки). Затем было проведено несколько серий расчетов частотных зависимостей для пустой акустической ячейки, и для ячейки, заполненной жидкостью с заданными параметрами. Из каждой рассчитанной частотной зависимости вносимых потерь в жидкости вычиталась ранее вычисленная частотная зависимость для свободной линии задержки. Это позволило уменьшить влияние затухания на краях измеряемого диапазона. Затем из полученной кривой, которая характеризует образец жидкости, вычислялся вектор признаков a. Каждый вектор дополнительно маркировался значением вязкости и проводимости соответствующего образца. К получившемуся в результате серии экспериментов набору векторов был применен метод LDA, при помощи которого размерность вектора признаков была понижена до 2, что позволило отобразить каждый образец на плоскости.

2. Результаты расчетов

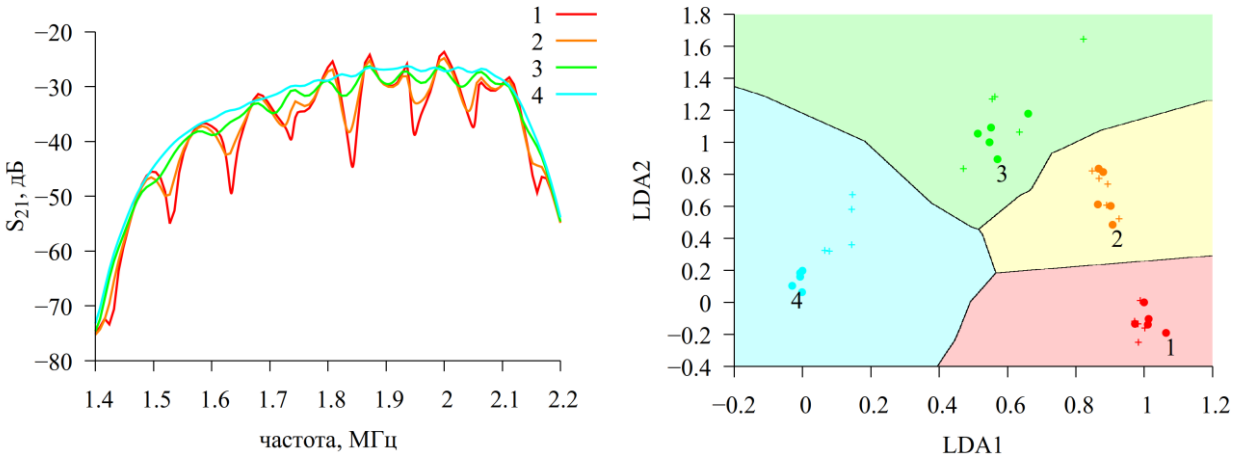
Для проведения проверки метода LDA было смоделировано пять групп образцов жидкостей со средней электрической проводимостью σ равной 1, 10, 100, 1000 и 10000 мкСм/см и четыре группы образцов жидкостей со средней сдвиговой вязкостью η равной 1, 10, 100 и 1000 мПа*с. При этом в каждой группе было 11 образцов, конкретная электрическая проводимость и вязкость которых отличалась от средней в пределах 50 - 150%.

Результаты применения метода LDA к образцам жидкостей показаны на рис. 1б и рис. 2б. На данных рисунках векторы признаков для каждого измерения, линейно спроецированы на абстрактные оси LDA1 и LDA2 при помощи вычисленного линейного классификатора, наилучшим образом разделяющем классы между собой. На каждом рисунке точками показаны образцы из обучающей выборки, которая использовалась при расчете линейного классификатора, а крестиками показаны остальные образцы, которые используются для проверки правильности решения задачи классификации. На рисунках наглядно видно, что все классы, соответствующие образцам из различных групп, образуют явно выраженные компактные кластеры и допускают однозначную классификацию каждого конкретного образца.



а) б)

Рис. 1. а) – частотные зависимости параметра S_{21} для образцов с различной электрической проводимостью, б) – результат классификации этих образцов методом LDA.
1 – 1 мкСм/см, 2 – 10 мкСм/см, 3 – 100 мкСм/см, 4 – 1000 мкСм/см, 5 – 10000 мкСм/см.



(а) (б)

Рис. 2. а) – частотные зависимости параметра S_{21} для образцов с различной вязкостью, б) – результат классификации этих образцов методом LDA.
1 – 1 мПа*с, 2 – 10 мПа*с, 3 – 100 мПа*с, 4 – 1000 мПа*с.

Сплошным цветом выделены области соответствующих кластеров, черной линией обозначены границы кластеров. Как видно, ни один из образцов не попал за пределы своего кластера. Это позволяет сделать вывод, что успешная классификация образцов вязких и проводящих жидкостей в указанных пределах данным методом возможна.

Заключение

В работе проведена проверка корректности классификации образцов жидкостей при помощи метода линейного дискриминантного анализа. Показано, что при помощи данного метода возможно различение образцов жидкостей с вязкостями в диапазоне 1 – 1000 мПа*с и с электрическими проводимостями в диапазоне 1 – 10000 мкСм/см. При этом ложных срабатываний классификатора обнаружено не было.

Финансирование.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН (FFWZ -2025-0001).

Список литературы

1. *Гуляев Ю.В., Плесский В.П.* Щелевые акустические волны в пьезоэлектрических материалах // Акуст. журн. 1977. Т. 23. № 3. С. 716-720.

2. *Балакирев М.К., Богданов С.В., Горчаков А.В., Чакушин А.Э.* Экспериментальное исследование щелевых волн в LiJ03 // ФТТ.1979. Т. 21. № 8. С. 2508-2510.

3. *Балакирев М.К., Гилинский И.А*. Волны в пьезокристаллах. Новосибирск: Наука, Сибирское Отделение, 1982. 239 с.

4. *Двоешерстов М.Ю., Чередник В.И., Петров С.Г., Чириманов А.П.* Численный анализ свойств щелевых электроакустических волн // Акуст. журн. 2004. Т. 50. №6. С. 776–782.

5. *Borodina I.A., Zaitsev B.D., Kuznetsova I.E., Teplykh A.A.,* Acoustic waves in a structure containing two piezoelectric plates separated by an air (Vacuum) gap // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. 2013. V. 60. № 12. P. 2677–2681.

6. *Зайцев Б. Д., Бородина И. А., Теплых А. А., Семёнов А. П.* Исследование щелевой моды в структуре, включающей линию задержки и резонирующую пьезоэлектрическую пластину // РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наноситемы. Информационные технологии, 2024, том 16, №4, сс. 449-456. DOI:10.17725/rensit.2024.16.449

7. Боровиков В. П. Искусство анализа данных. СПб.: ПИТЕР. 2005. 688 с.

8. Discriminant Analysis and Statistical Pattern Recognition. Geoffrey J. McLachlan. WILEY-INTERSCIENCE. A JOHN WILEY & SONS, INC., 2004. ISBN: 0-471-61531-5

УДК: 534 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39501

Многомодовые акустические сенсоры и сенсорные решетки

В.И. Анисимкин

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, ул. Моховая, д.11, к. 7, Москва, 125009

E-mail: anis@cplire.ru

Аннотация: Обсуждается чисто акустический подход к построению микроэлектронных сенсоров и сенсорных решеток различного назначения. Ключевая идея подхода - использование вместо одного сенсорного свойства одного типа акустических колебаний всех свойств и колебаний, которые могу существовать в твердотельных структурах. Поскольку в настоящее время известно более 10 типов волн, и каждая из них обладает своей реакцией на внешнее воздействие, то, выбирая тип, количество и свойства волн, зондирующих среду, примыкающую к структуре, можно сформировать требуемую совокупность акустических откликов. Аналогично, можно решить обратную задачу – измерить несколько характеристик примыкающей среды. В этом случае фиксируются характеристики ряда зондирующих волн, составляется система уравнений, связывающая характеристики волн с параметрами среды, и при числе уравнений, равном числу неизвестных, находится однозначное решение этой системы. Новый подход демонстрируется на примерах: 1) решетки газовых датчиков с разными откликами при одной чувствительной пленке для всех датчиков; 2) термокондуктометрических сигнализаторов несанкционированного проникновения в замкнутые помещения (атомные станции, банки, музеи); 3) датчиков вязкости для анализа крови с различным содержанием тромбов; 4) решетки датчиков-эталонов и распознавателей пяти базовых вкусов –сладкого, соленного, горького, кислого, умами; 5) датчиков фазового перехода жидкость-лед, фиксирующих динамику льдообразования в реальном масштабе времени.

Ключевые слова: акустические сенсоры, сенсорные решетки, газы, жидкости

Multimode acoustic sensors and sensor arrays

V.I. Anisimkin

Institute of Radio Engineering and Electronics V.A. Kotelnikov RAS 11, bldg. 7, Mokhovaya St., Moscow, 125009, Russian Federation

E-mail: anis@cplire.ru

Abstract: A purely acoustic approach to the design of microelectronic sensors and sensor arrays for various applications is discussed. The key idea of the approach is to use, instead of a single sensing property of one type of acoustic wave, all the properties and waves that can exist in solid-state structures. Since more than 10 types of waves are currently known, each exhibiting its own response to external influences, by selecting the type, number, and properties of the waves probing the medium adjacent to the structure, the required set of acoustic responses can be formed. Similarly, the inverse problem can be solved – measuring several characteristics of the adjacent medium. In this case, the characteristics of a number of probing waves are recorded, a system of equations relating the wave characteristics to the medium parameters is compiled, and when the number of equations equals the number of unknowns, a unique solution to this system is found. The new approach is demonstrated using the following examples: 1) arrays of gas sensors with different responses using a single sensitive film for all sensors; 2) thermal conductivity detectors for unauthorized intrusion into enclosed spaces (nuclear power plants, banks, museums); 3) viscosity sensors for analyzing blood with different thrombus contents; 4) an array of reference sensors and recognizers for the five basic tastes – sweet, salty, bitter, sour, umami; 5) sensors for the liquid-ice phase transition, monitoring ice formation dynamics in real time.

Keywords: acoustic sensors, sensor arrays, gases, liquids

УДК: 534.141; 534.143 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39502

Эффективность электромеханического преобразования поверхностных и нормальных акустических волн в слоистых структурах пьезоэлектрическая пленка на непьезоэлектрическом кремнии.

Н.В. Воронова [1]

[1] *Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники». АО «НИИМЭ», 124460, Россия, Москва, Зеленоград, улица Академика Валиева, 6/1*

e-mail: [1] navoronova@niime.ru

Аннотация: Создание акустоэлектронных устройств на основе кремния позволяет объединить электрическую и акустическую обработку сигналов на одной подложке [1]. Однако традиционное использование этого материала в акустоэлектронике не представляется возможным из-за отсутствия пьезоэлектрических свойств [2]. Возбуждение акустических волн в кремнии требует дополнительного нанесения пленок ZnO или AlN, обладающих пьезоэффектом. При этом толщины пленок имеют величину h = 1-10 мкм, а подложек - H = 300-500 мкм, что на 2 порядка больше. В этой связи возникает вопрос об эффективности электромеханического преобразования в таких структурах. В настоящей работе этот вопрос решается путем расчета коэффициента электромеханической связи K^2 в зависимости от h/λ и H/λ, где λ - длина волны. Расчеты проведены для четырех конфигураций встречно-штыревых преобразователей, двух типов акустических волн: поверхностных (ПАВ) и нормальных (НАВ), и двух слоистых структур (ZnO/Si и AlN/Si). Расчеты показали, что несмотря на малую долю энергии, которая распространяется в пьезоэлектрической пленке при $h/\lambda_{НАВ} \sim 0.05$, $h/\lambda_{ПАВ} \sim 0.5$ и $H/\lambda_{НАВ} \sim 1$, величина K^2 для НАВ и ПАВ в слоистой структуре может быть сравнимой и даже превышать значение этого коэффициента в объемном кристалле, когда вся энергия ПАВ локализована в пределах пьезоэлектрической среды. При этом $K^2_{НАВ}$ зависит от номера моды и толщины пластины, позволяя варьировать его величину от 0 до нескольких процентов. Численные расчеты частично подтверждены экспериментом.

Ключевые слова: кремниевая подложка, пленки ZnO и AlN, коэффициент электромеханической связи, поверхностные и нормальные акустические волны.

Efficiency of electromechanical conversion of surface and normal acoustic waves in layered structures of piezoelectric film on non-piezoelectric silicon.

N.V. Voronova[1]

[1] *Joint Stock Company " Molecular Electronics Research Institute." JSC "MERI," Akademika Valieva street, 6/1, Zelenograd, Moscow,124460, Russia*

e-mail: [1] navoronova@niime.ru

Abstract: The creation of acoustoelectronic devices based on silicon makes it possible to combine electrical and acoustic signal processing on one substrate[1]. However, the traditional use of this material in acoustoelectronics is not possible due to the lack of piezoelectric properties [2]. Excitation of acoustic waves in silicon requires additional deposition of ZnO or AlN films having a piezo effect. Thickness of films is h = 1-10 mcm, and thickness of substrates is H = 300-500 mcm, which is 2 orders of magnitude more. This raises the question of the efficiency of electromechanical conversion in such structures. In the present work, this issue is solved by calculating the electromechanical coupling coefficient K^2 depending on h/λ and H/λ, where λ is the wavelength. Calculations were carried out for four configurations of interdigital transducers, two types of acoustic waves: surface (SAW) and normal (HAB), and two layered structures (ZnO/Si and AlN/Si). Calculations have shown that despite the small fraction of energy that propagates in the piezoelectric film at $h/\lambda_{NAW} \sim 0.05$, $h/\lambda_{surfactant} \sim 0.5$ and $H/\lambda_{NAW} \sim 1$, the K^2 value for NAW and surfactant in the layered structure may be comparable and even exceed the value of this coefficient in the bulk crystal when all the surfactant energy is localized in piezoelectric medium. In this case, the K^2_{NAW} depends on the mode number and the thickness of the plate, allowing you to vary its value from 0 to several percent. Numerical calculations are partially confirmed by experiment.

Keywords: silicon substrate, ZnO and AlN films, electromechanical coupling coefficient, surface and normal acoustic waves.

PACS: 43.20.+g, 43.60.−c, 43.35.Pt

Список литературы

1. *Н. В. Воронова, В. И. Анисимкин, Е. С. Горнев [и др.]*. Кремниевый датчик микрокапель летучих жидкостей. Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии. – 2025. – **Т. 17**, № 2. – С. 167-172. – DOI 10.17725/rensit.2025.17.167. – EDN ESVBQL.

2. *Красников Г.Я., Горнев Е.С., Матюшкин И.В.* Общая теория технологии и микроэлектроника: часть 2. Вопросы метода и классификации // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника. 2017. № 4 (168). С. 16-41. EDN: ZUQSZZ

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39503

Акустоэлектронные сенсоры на основе упорядоченных пленок Ленгмюра-Блоджетт

Горбачев И.А.[1)], Смирнов А.В. [1)], Кузнецова И.Е. [1)], Колесов В.В. [1)], Анисимкин В.И. [1)]
Ягодин А.В. [2)], Мартынов А.Г. [2)], Горбунова Ю.Г.[2,3)]
[1)] ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, г. Москва, ул Моховая 11, стр. 7.
[2)] ИФХЭ им. А.Н. Фрумкина РАН, г. Москва, Ленинский пр., 31, стр. 4
3) ИОНХ им. Н.С. Курнакова РАН, г. Москва, Ленинский пр. 31

Тел.: (927 2226826);
E-mail: iliyagor36@gmail.com

Развитие аналитической химии, биомедицины и экологического мониторинга требует создания сенсоров нового поколения, обладающих повышенной чувствительностью и селективностью к разнообразным целевым веществам. В ряду современных средств детектирования акустоэлектронные датчики представляют собой самостоятельный класс устройств, сочетающий высокую чувствительность и быстродействие. Одним из направлений развития акустоэлектронных сенсоров является разработка интерфейса, способного эффективно реагировать на присутствие целевых веществ различной природы. В работе была исследована возможность создания такого интерфейса на поверхности акустоэлектронных устройств с помощью технологии Ленгмюра-Блоджетт (ЛБ). Представлены результаты, посвященные исследованию сенсорных свойств функциональных пленок, полученных методом ЛБ для применения в качестве чувствительных покрытий акустоэлектронных устройств. В рамках проведенной работы были разработаны акустоэлектронные сенсоры, способные детектировать пары летучих химических соединений, а также сенсор глюкозы в ее водных растворах. Установлено наличие влияние надмолекулярной организации пленок ЛБ на регистрируемый аналитический сигнал. Полученные результаты подтверждают перспективность использования метода Ленгмюра-Блоджетт для создания высокочувствительных сенсоров нового поколения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-19-00872.

Ключевые слова: акустоэлектронный сенсор, сенсор паров химических соединений, пленки Ленгмюра-Блоджетт, биопленки, пленки фталоцианинов

Acoustoelectronic sensors based on ordered Langmuir–Blodgett films

Gorbachev I.A.[1)], Smirnov A.V. [1)], Kuznetsova I.E. [1)], Kolesov V.V. [1)], Anisimkin V.I. [1)], Yagodin A.V. [2)], Martynov A.G. [2)], Gorbunova Y.G.[2,3)]

[1)] IRE V.A. Kotelnikova RAS,. Moscow Mokhovaya str. 11/7

[2)] Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of the Russian Academy of Sciences, Leninsky ave., 31/4

3) Kurnakov IGIC RAS, Moscow, Leninsky ave., 31

Phone.: +7(927 2226826);

E-mail: iliyagor36@gmail.com

The development of analytical chemistry, biomedicine, and environmental monitoring requires the creation of next-generation sensors characterized by enhanced sensitivity and selectivity toward a wide range of target substances. Among modern detection tools, acoustoelectronic sensors represent a distinct class of devices that combine high sensitivity with rapid response times. One of the key directions in the advancement of acoustoelectronic sensors is the development of an interface capable of effectively responding to the presence of various target analytes.

This study investigates the feasibility of creating such an interface on the surface of acoustoelectronic devices using the Langmuir–Blodgett (LB) technique. The paper presents findings on the sensing properties of functional films obtained via the LB method for use as sensitive coatings in acoustoelectronic devices. As part of this work, acoustoelectronic sensors were developed for the detection of volatile organic compound vapors, as well as a glucose sensor for aqueous solutions. The influence of the supramolecular organization of LB films on the recorded analytical signal was established. The results obtained confirm the promising potential of the Langmuir–Blodgett method for the development of high-performance, next-generation sensors.

The work was supported by the Russian Science Foundation № 25-19-00872.

Keywords: Acoustoelectronic sensor, chemical vapor sensor, Langmuir–Blodgett films, biofilms, phthalocyanine films

УДК: 539.261. DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39504

Дифракция рентгеновского излучения на кристалле ниобата лития, промодулированного поверхностной акустической волной

Д.В. Иржак[a], С.Е. Куманяев[b], К.С. Пундиков[c], Д.В. Рощупкин[d], Р.Р. Фахртдинов[e]

Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН, Московская обл, г. Черноголовка, ул. Акалемика Осипьяна, д. 6.

E-mail: [a]irzhak@iptm.ru, [b]skumanyaev2002@mail.ru, [c]kkbhbr2010@yandex.ru, [d]rochtch@iptm.ru, erash@iptm.ru

Аннотация: Представлены результаты исследования дифракции рентгеновского излучения на изогнутом YZ-срезе кристалла ниобата лития, промодулированного поверхностной акустической волной. Исследования проводились на источнике синхротронного излучения с использованием метода рентгеновской дифрактометрии. Модуляция кристаллической решетки изогнутого кристалла поверхностной акустической волной приводит к формированию динамической дифракционной решетки, что проявляется в существенном изменении формы кривых качания. Исследовались особенности дифракции рентгеновского излучения для асимметричного (054) отражения. Результаты экспериментальных исследований и моделирование дифракции рентгеновского излучения на изогнутом YZ-срезе кристалла ниобата лития, промодулированном поверхностной акустической волной позволили определить основные особенности дифракционной картины, связанные как с распространением акустической волны, так и с формой поверхности.

Ключевые слова: Рентгеновская дифрактометрия, Поверхностная акустическая волна, Ниобат лития

X-ray diffraction on a lithium niobate crystal modulated by a surface acoustic wave

D.V. Irzhak[a], S.E. Kumanyaev[b], K.S. Pundikov[c], D.V. Roshchupkin[d], R.R. Fakhrtdinov[e]

Institute of Microelectronics Technology and High-Purity Materials Russian Academy of Sciences, Ac. Osipian str., 6, Chernogolovka, Moscow District, 142432, Russia

E-mail: [a]irzhak@iptm.ru, [b]skumanyaev2002@mail.ru, [c]kkbhbr2010@yandex.ru, [d]rochtch@iptm.ru, erash@iptm.ru

Abstract: The results of a study of X-ray diffraction by a curved YZ-cut lithium niobate crystal modulated by a surface acoustic wave are presented. The studies were conducted at a synchrotron

radiation source using X-ray diffractometry. Modulation of the crystal lattice by a surface acoustic wave leads to the formation of a dynamic diffraction grating, which is manifested in a significant change in the shape of the rocking curves. The X-ray diffraction features were examined for asymmetric (054) reflection. Results from experimental studies and modeling of X-ray diffraction on a curved YZ-cut lithium niobate crystal modulated by a surface acoustic wave have enabled the identification of key features in the diffraction pattern, which are associated with both the acoustic wave propagation and the surface geometry.

Keywords: X-ray diffractometry, Surface acoustic wave, Lithium niobate

PACS: 61.05.C

Введение

Рентгеновская дифрактометрия и топография представляют собой мощные инструменты для исследования дефектов структуры и полей деформаций в монокристаллах [1-5]. В случае, когда кристалл подвергается воздействию поверхностной акустической волны, периодическая модуляция параметров кристаллической решетки приводит к возникновению эффекта динамической дифракционной решетки для рентгеновских лучей [2]. Это явление, описываемое в рамках динамической теории дифракции, проявляется в возникновении сателлитных максимумов вокруг основного брэгговского пика, изменении интегральной интенсивности и существенной трансформации формы кривых качания. Большинство существующих теоретических и экспериментальных работ посвящено исследованию дифракции на плоских кристаллических пластинках, где поле деформаций определяется исключительно параметрами распространяющейся в кристалле ПАВ [2]. Однако на практике для изготовления акустоэлектронных устройств используются подложки, изогнутые вследствие особенностей обработки. Введение механического изгиба кристалла создает сложное распределение статических напряжений, которое накладывается на динамические деформации, вызванные распространением ПАВ. Взаимодействие статической деформации изгиба и динамической деформации акустической волны может приводить к нетривиальным эффектам перераспределения интенсивности дифрагированного пучка, изменению условий брэгговского отражения по площади кристалла и модификации топографического контраста.

Ключевую роль в решении данной задачи играет использование источников синхротронного излучения (СИ). Высокая яркость, малая угловая расходимость и возможность выбора необходимой длины волны СИ позволяют реализовывать схемы рентгеновской топографии и дифрактометрии с высоким пространственным и угловым разрешением [6]. Это дает возможность регистрировать тонкие эффекты, связанные с

локальными изменениями межплоскостных расстояний и ориентации отражающих плоскостей, которые недоступны для наблюдения на лабораторных источниках.

Материалы и методы

Исследования проводились на YZ-срезе монокристаллической подложки $LiNbO_3$ размером 8×12×0.5 мм³. Для возбуждения поверхностных акустических волн (ПАВ) на поверхности кристалла был изготовлен встречно-штыревой преобразователь (ВШП). Апертура ВШП составляла W=60 Λ, N=50 пар электродов, а коэффициент металлизации S=0.5. Данный ВШП использовался для возбуждения распространяющейся ПАВ с длиной волны Λ=4 мкм. ПАВ возбуждалась высокочастотным генератором RIGOL DSG815, амплитуда электрического сигнала составляла 2,24 В. Резонансная частота возбуждения f_0=860 МГц соответствовала скорости распространения ПАВ V=3488 м/с.

Исследования проводились на линии «Рентгеновская кристаллография и физика материалов» (РКФМ) Курчатовского источника синхротронного излучения [6]. Для исследования дифракции рентгеновского излучения на кристалле $LiNbO_3$, промодулированном ПАВ, использовался метод рентгеновской дифрактометрии.

Моделирование базировалось на решении уравнений динамической теории дифракции (уравнений Такаги-Топэна) [7] с учетом полного поля деформаций, складывающегося из статической компоненты изгиба и динамической компоненты, вызванной распространением ПАВ.

Результаты исследований

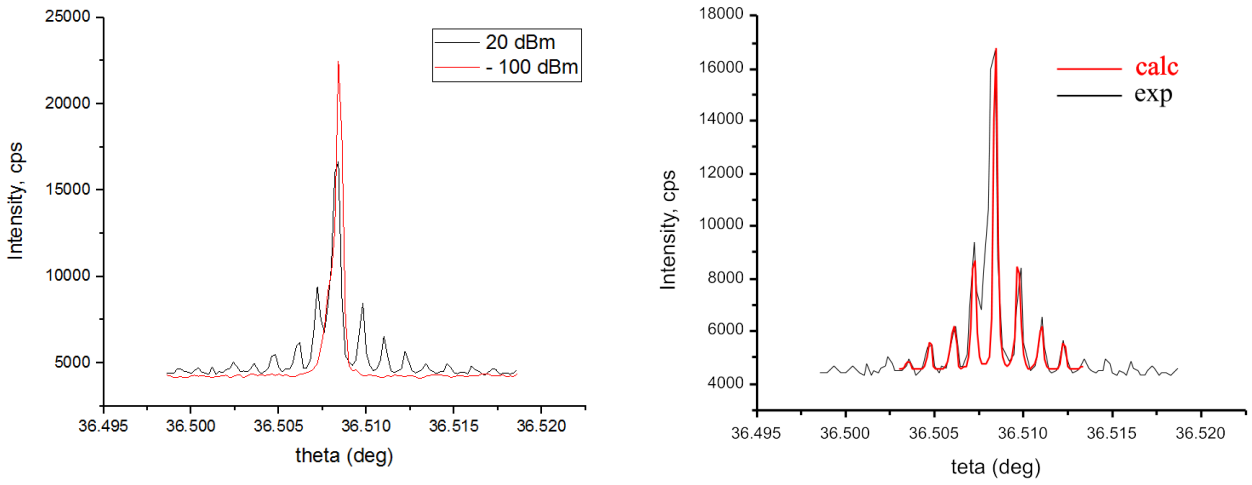
На рисунке 1а представлены кривые качания кристалла ниобата лития, промодулированного ПАВ с различными амплитудами. Кривая качания в целом соответствует результатам многократно описанным ранее [2]. Угловое расстояние между дифракционными сателлитами на кривой качания определяется известным выражением [2]:

$$\delta\Theta = d / \Lambda, \quad (1)$$

где d – межплоскостное расстояние, Λ - длина волны ПАВ.

Угловая расходимость между дифракционными сателлитами на кривой качания рисунке 1 составляет δΘ=0.0022°, что соответствует расчетному значению из выражения (1).

Сравнение результатов моделирования кривой качания кристалла $LiNbO_3$, промодулированного ПАВ с амплитудой 0,75 Å, и экспериментальной кривой качания, полученной при амплитуде высокочастотного сигнала 20 дБм, представлено на рисунке 1б.



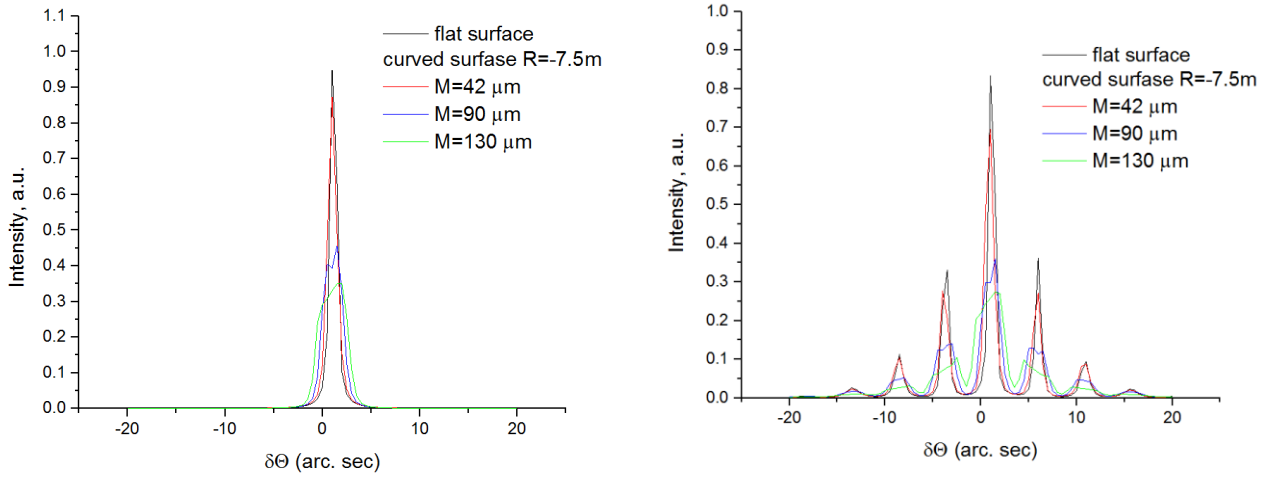
а б

Рисунок 1 - Дифракция рентгеновского излучения на кристалле $LiNbO_3$, промодулированном ПАВ: а) кривые качания акустически промодулированного кристалла, измеренные при различных амплитудах входного высокочастотного сигнала на ВШП; б) сравнение расчетов с результатами измерений

Моделирование кривых качания проводилось интегрированием системы уравнений Такаги-Топэна с учетом деформации кристаллической решетки, вызванной распространением ПАВ [2] и изгибом кристаллической подложки. Интегрирование осуществлялось методом конечных разностей на треугольной сетке, сформированной по направлениям распространения падающей и дифрагированной волн рентгеновского излучения. Шаг интегрирования в направлении распространения ПАВ составлял 11.7 нм. Длина области интегрирования вдоль поверхности кристалла составляла 300 мкм. Расчет проводился с учетом изгиба монокристаллической подложки, радиус изгиба принимался R=7,5м, а так же ширины проекции падающего пучка рентгеновского излучения M=42 мкм. На кривых качания наблюдается совпадение углового положения дифракционных сателлитов, однако на смоделированной кривой полуширина нулевого порядка дифракции существенно меньше. Это может объясняться тем, что в модели не учитываются дефекты кристаллической структуры реального кристалла, которые могут приводить к уширению кривой качания.

Изгиб подложки существенным образом влияет на характер кривой качания. Если в случае плоской поверхности зависимость вида кривой качания от величины проекции рентгеновского пучка на поверхность кристалла отсутствует, то при изгибе поверхности

проявляется существенная зависимость как интенсивности, так и ширины кривой качания от величины проекции падающего пучка рентгеновского излучения на поверхность кристалла. Причем, изменения касаются как кривой качания кристалла, промодулированного ПАВ, так и кристалла, в котором отсутствует акустическая модуляция. Это продемонстрировано на рисунке 2.



а б

Рисунок 2 - Сравнение кривых качания для отражения (054) YZ-среза кристалла $LiNbO_3$, с плоской поверхностью, и поверхностью с радиусом изгиба R=-7,5 м, промодулированного ПАВ с амплитудой ПАВ а) 0 Å; б) 0,5 Å при различных величинах проекции падающего пучка рентгеновского излучения

Увеличение длины проекции приводит к существенному уменьшению интенсивности максимумов дифракционных сателлитов а так же к увеличению их ширин. По характеру изменения кривых качания можно сделать вывод, что в случае искривленного кристалла для получения результатов наиболее приближенных к случаю ровной поверхности необходимо уменьшать ширину падающего рентгеновского пучка, и тогда при моделировании можно будет не учитывать параметры, связанные с кривизной поверхности. В ином случае необходимо проводить дополнительные измерения для оценки кривизны образца.

Заключение

В работе представлены результаты исследования дифракции рентгеновского излучения на изогнутом YZ-срезе кристалла ниобата лития, на поверхности которого распространялась поверхностная акустическая волна. Были исследованы особенности дифракции для асимметричного (054) отражения. Для физической интерпретации экспериментальных данных, включая анализ существенных изменений формы кривых качания, было проведено численное моделирование процесса дифракции.

Сочетание экспериментальных данных с результатами теоретического моделирования позволило не только качественно описать наблюдаемые эффекты, но и количественно оценить влияние искривления поверхности монокристаллической подложки на характеристики кривых качания.

Исследования проведены при поддержке Российского научного фонда, грант 25-72-20016.

Список литературы

1. L. Largeau, I. Camara, J.-Y. Duquesne, C. Gourdon, P. Rovillain, L. Thevenard, and B. Croset, Laboratory X-ray characterization of a surface acoustic wave on GaAs: the critical role of instrumental convolution/ L. Largeau, I. Camara, J.-Y. Duquesne, C. Gourdon, P. Rovillain, L. Thevenard, and B. Croset// J. Appl. Crystallogr. – 2016, – **Vol.** 49, – P. 2073

2. I. A. Schelokov, D. V. Roshchupkin, D. V. Irzhak and R. Tucoulou Dynamical theory for calculations of X-ray spectra from crystals modulated by surface acoustic waves/ I. A. Schelokov, D. V. Roshchupkin, D. V. Irzhak and R. Tucoulou// J. Appl. Cryst. – 2004. – Vol. 37, – P.52-61,

3. Cerva, H. and Graeff, W., Contrast investigations of surface acoustic waves by stroboscopic topography. I./ Cerva, H. and Graeff, W.// Orientation contrast Phys. stat. sol. (a), – 1984, – Vol. 82: – P. 35-45

4. D. V. Roshchupkin, H. D. Roshchupkina and D. V. Irzhak, X-ray topography analysis of acoustic wave fields in the SAW-resonator structures/ V. Roshchupkin, H. D. Roshchupkina and D. V. Irzhak// 2005 IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control – 2005. – Vol. 52, – P. 2081-2087

5. B. Capelle, Y. Epelboin, J. Detaint, A. Soyer and J. Hartwig, Time resolved synchrotron radiation X-ray topography study of surface acoustic waves propagation/ B. Capelle, Y. Epelboin, J. Detaint, A. Soyer and J. Hartwig// 2009 IEEE International Frequency Control Symposium Joint with the 22nd European Frequency and Time forum, Besancon, France, – 2009, – P. 299-304

6. Kohn, V.G., Prosekov, P.A., Seregin, A.Y. Experimental Study of Two-Beam X-Ray Diffractometry Using Synchrotron Radiation./ Kohn, V.G., Prosekov, P.A., Seregin, A.Y.// Crystallogr. Rep. – 2019. – Vol. 64. – P. 24–29

7. Takagi, S. A Dynamical theory of diffraction for a distorted crystals / S. Takagi // Journal of the Physical Society of Japan. – 1969. – Vol. 26. – P. 1239-1253

УДК: 621.372.63 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39505

Свойства STW волн в кварце и высокочастотные пьезоэлектрические фильтры на их основе

С.С. Дорофеева[1,a], Т.В. Синицына[1,b]

[1] *ООО «БУТИС»*

109316, г. Москва, Волгоградский проспект, д.42, корп.5

E-mail: [a] *s.dorofeeva@mail.ru*, [b] *sinicina@butis.ru*

Аннотация: Работа посвящена исследованиям свойств STW волн, распространяющихся в *YXls*/ψ/90° срезах кварца, впервые выявлен эффект естественной направленности излучения волны. При использовании YXls/36°/90° среза кварца и пленок Al с относительной толщиной в диапазоне 1.95%...2.23% для высокочастотных фильтров получен ТКЧ(2)=-0.043·10^{-6} 1/°C^2 в диапазоне рабочих температур от минус 60°C до +85°C.

Ключевые слова: пьезоэлектрические материалы, фильтр на ПАВ, STW, температурный коэффициент частоты, кварц

Properties of STW in quartz and high-frequency piezoelectric filters based on them

S.S. Dorofeeva[1,a], T.V. Sinitcina[1,b]

[1] «BUTIS» Ltd

109316, Moscow, Volgogradsky Prospekt, 42, b. 5;

E-mail: [a] *s.dorofeeva@mail.ru*, [b] *sinicina@butis.ru*

Abstract: The work is devoted to the investigation of the properties of STW waves in YXls/ψ/90° cuts of quartz. The effect of the natural directivity of the wave radiation has been revealed for the first time. When using a YXls/36°/90° cut of quartz and Al films with a relative thickness in the range of 1.95%...2.23% for high-frequency filters, a TCF (2)=-0,043·10^{-6} 1/°C^2 was obtained in the operating temperature range from minus 60°C to +85 °C.

Keywords: piezoelectric materials, SAW filter, surface transverse wave, temperature coefficient of frequency, quartz

PACS: 12.20.Fv

Введение

В современной акустоэлектронике особое внимание уделяется разработке высокочастотных термостабильных устройств для систем беспроводной связи. Традиционно

для этих целей используются поверхностные акустические волны (ПАВ) рэлеевского типа на основе YXl/ψ срезов кварца [1]. Однако малый коэффициент электромеханической связи кварца ($k^2 \approx 0.14\%$) ограничивает полосу пропускания устройств до 4.5% [2], а низкая скорость распространения ПАВ (~3158 м/с) затрудняет реализацию высокочастотных устройств.

Альтернативой ПАВ являются поверхностные сдвиговые волны (surface transverse wave, STW), впервые описанные в работах Ю.В. Гуляева и В.П. Плесского [3]. STW-волны характеризуются более высокой скоростью распространения (~5000 м/с) и потенциально лучшими параметрами возбуждения при использовании пленок тяжелых металлов [3]. Однако информация о свойствах STW-волн в YXls/ψ/90° срезах кварца при использовании пленок Al, которые применяются в стандартных технологических процессах изготовления ПАВ-устройств, носит ограниченный характер.

Целью настоящей работы является исследование электрофизических свойств STW-волн в YXls/ψ/90° срезах кварца с использованием пленок алюминия разной толщины, выбор оптимальной по совокупности параметров кристаллографической ориентации (угла ψ) и разработка на основе полученных результатов высокочастотных термостабильных пьезоэлектрических фильтров.

1 Исследование свойств STW-волн в YXls/ψ/90° срезах кварца

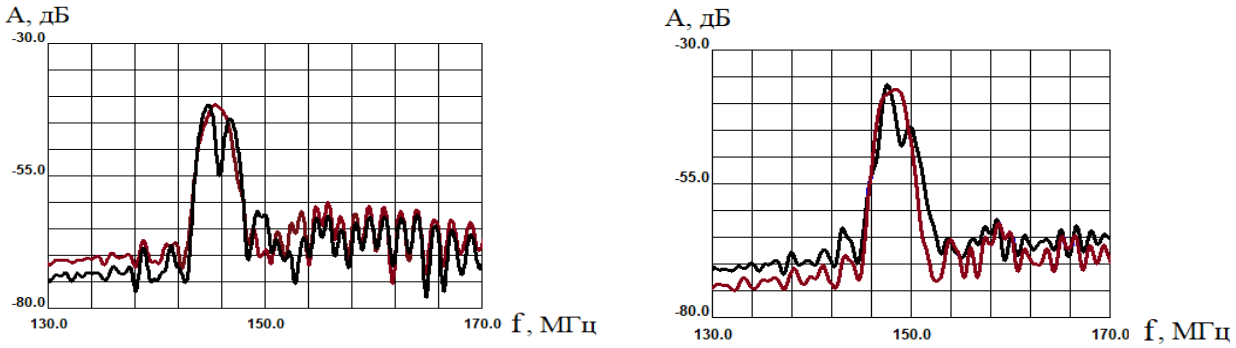
На первом этапе исследований использовалось два типа тестовых структур: линия задержки для оценки эффективности возбуждения волны, определения скорости распространения и коэффициентов отражения, и резонатор для качественной оценки затухания волны, коэффициента отражения и коэффициента электромеханической связи. Экспериментальные образцы изготавливались на основе YXls/36°…42°/90° срезов кварца. Для подтверждения достоверности результатов в едином технологическом цикле были изготовлены контрольные образцы ПАВ линий задержки (кристаллографические ориентации YXl/42° и YXl/36° срезы кварца, соответственно). Технология изготовления предусматривала формирование топологических элементов методом прямой фотолитографии с пленкой Al толщиной от 2000Å (h_m/λ=0.61%) до 6500Å (h_m/λ=1.625%).

Измерительное оборудование включало специализированный стенд для измерения скорости волны на свободной поверхности, измеритель комплексных коэффициентов передачи и отражения "Обзор-804/1", атомно-силовой микроскоп NT-MDT VEGA для контроля геометрии электродов с точностью до 10 нм, а также термокамеру для исследований температурной стабильности в диапазоне от -60°C до +85°C.

Проведенные исследования показали существенную разницу в скоростях STW и ПАВ на свободной поверхности: для YXls/42°/90° среза скорость STW составила 5000 м/с, для YXls/36°/90° среза - 5100 м/с. Измеренное значение скорости ПАВ составило 3157,5 м/с, что подтверждает высокую точность методики измерений и используемого измерительного оборудования.

Что касается коэффициента электромеханической связи и коэффициента отражения, то результаты исследований свойств STW в низкочастотном диапазоне (НЧ) показали следующую динамику: при толщине пленки Al h_m/λ=0.61% получены коэффициент связи k^2=0.07% и коэффициент отражения r=0.004. При увеличении толщины пленки Al до h_m/λ=1.625% значения данных параметров возросли до k^2=0.17% и r=0.035. Толщина пленки Al h_m/λ=1.5% соответствует значению, при котором STW волна по эффективности возбуждения и уровню отражения начинает превосходить ПАВ (k^2=0.134%, коэффициент отражения r=0.0076).

Исследования тестовых образцов линий задержки, изготовленных на основе YXls/ψ/90° срезов кварца с использованием пленок Al малой толщины, рис. 1а, позволили выявить ярко выраженную направленность излучения STW, обусловленную пространственным разнесением эффективных центров отражения и преобразования волны. При этом было установлено, что с уменьшением угла ψ и увеличением толщины пленки Al условия отражения меняются, что приводит к существенной асимметрии АЧХ в обратном направлении (рис. 1б).



а) б)

Рисунок 1 – АЧХ STW линий задержки в прямом (бордовая) и обратном (черная) направлениях, реализованных на основе: а) YXls/42°/90° среза кварца при hm=2000Å (0.61%); б) YXls/36°/90°-среза кварца при hm=4000Å (1.19%).

Для проведения исследований в высокочастотном диапазоне использовалась базовая конструкция фильтров на основе резонаторов с продольной акустической связью, рис.2, содержащая входной и выходной встречно-штыревые преобразователи (ВШП) и две отражательные решетки (ОР), формирующие резонаторную полость. Преимуществом

данной конструкции является возможность реализации фильтров с малым уровнем вносимого затухания на основе слабых пьезоэлектриков.

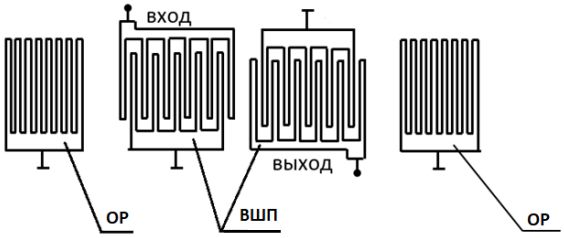
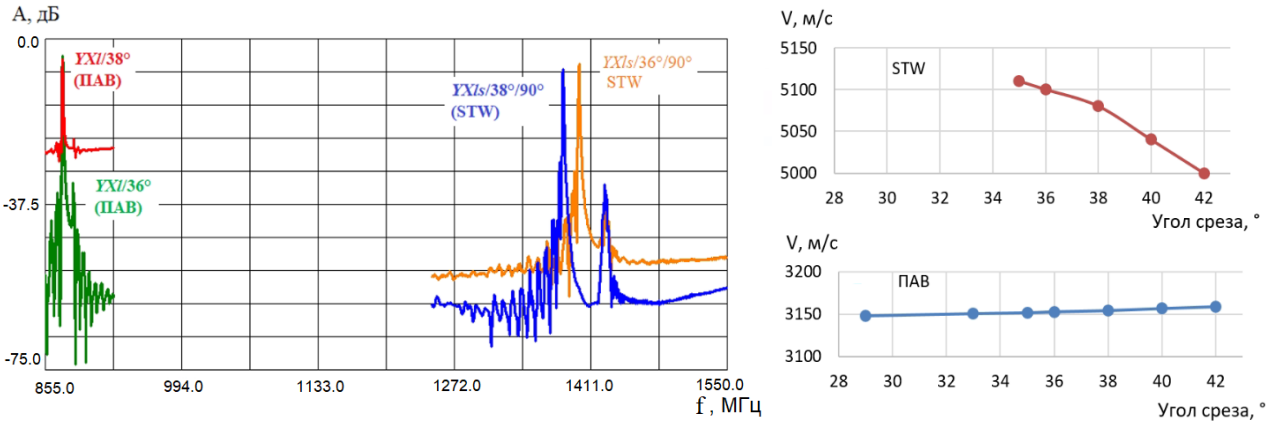


Рисунок 2 – Базовая конструкция фильтра на основе резонаторов с продольной акустической связью.

Результаты сравнительных исследований STW и ПАВ фильтров в высокочастотном диапазоне подтвердили результаты, полученные для НЧ диапазона. Была подтверждена сильная анизотропия свойств STW-волн в YXls/ψ/90° срезах кварца от угла ψ и толщины пленки Al. На рис. 3 видно, что центральные частоты STW-фильтров существенно выше, чем у ПАВ-фильтров при одинаковых геометрических параметрах, что обусловлено более высокой скоростью распространения STW-волн. Кроме того, в STW срезах кварца изменение угла ψ на 1° приводит к изменению величины скорости волны на свободной поверхности на 15-18 м/с. Тогда как в *YXl*/ψ срезах кварца с уменьшением угла ψ скорость ПАВ на свободной поверхности уменьшается на ≈1 м/с на 1°.

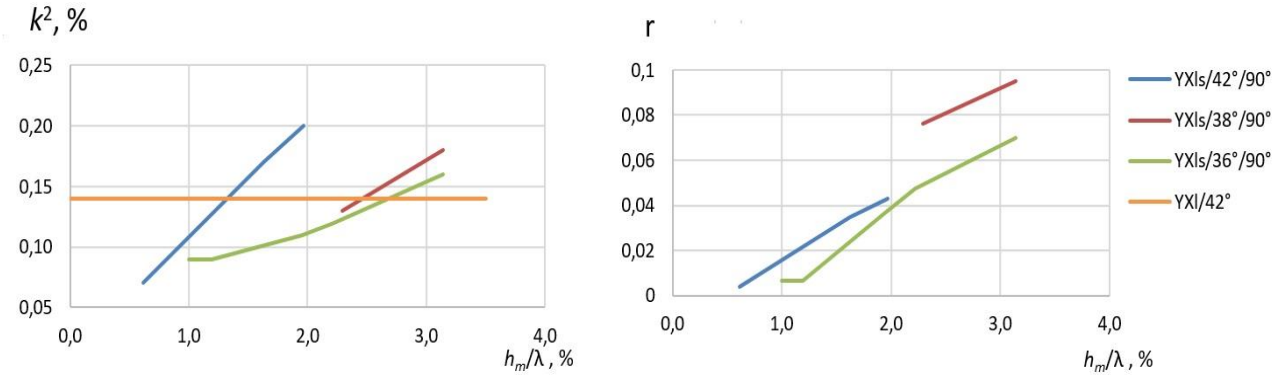


а) б)

Рисунок 3 – а) АЧХ экспериментальных образцов фильтров, изготовленных на основе YXl/ψ и YXls/ψ/90° срезов кварца; б) изменение скорости STW (срезы кварца YXls/ψ/90°) и ПАВ (срезы кварца YXl/ψ) на свободной поверхности от угла ψ.

Обработка результатов экспериментов проводилась в ПО SAW_PM (является собственной разработкой ООО «БУТИС») методом P-матриц, основанном на теории связанных мод (COM - coupling-of-modes). Сравнение экспериментальных и моделированных характеристик подтвердило высокую точность разработанной математической модели. Учет эффекта естественной направленности за счет параметра «Angle» в элементах *P*-матрицы,

определяющего разность фаз между эффективными центрами отражения и преобразования волны позволил достичь практически полного совпадения расчетных и экспериментальных данных, что свидетельствует о корректности выбранного подхода к моделированию. По нашим данным, STW-волны в *YXls*/38°/90° срезе кварца имеет максимальную разность фаз между эффективными центрами отражения и преобразования волны в 25°, а также обеспечивает максимальные коэффициенты отражения и электромеханической связи среди исследованных ориентаций. По результатам обработки проведенных экспериментов получены зависимости основных параметров STW (коэффициенты электромеханической связи и отражения) от относительной толщины пленки, которые являются определяющими для проектирования STW фильтров, рис. 4.

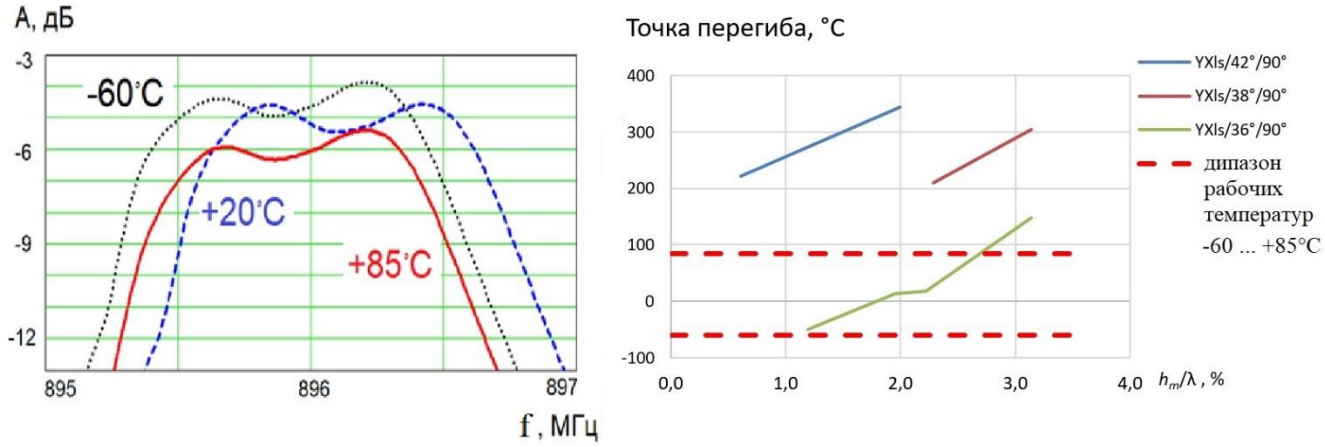


а) б)

Рисунок 4 – Зависимость коэффициента связи k^2 (а) и коэффициента отражения r (б) от относительной толщины пленки алюминия h_m/λ для YXls/42° … 36°/90° срезов кварца.

2 Температурная стабильность высокочастотных STW-фильтров на основе YXls/ψ/90° срезов кварца

Исследования температурной стабильности проводились на *YXls*/36°/90° срезе кварца, который по результатам исследований в НЧ диапазоне обеспечил достаточно малый ТКЧ устройств, а также на близком к нему по термостабильности *YXls*/38°/90° срезе кварца. Наиболее интересные результаты были получены для STW-фильтров на основе YXls/36°/90° среза кварца. При толщине пленки Al h_m/λ=1.95% ТКЧ(2) составил $-0.043\cdot10^{-6}$ 1/°C² с точкой перегиба при +13.4°C. При увеличении толщины до hm/λ=2.23% ТКЧ(2) составил $-0.048\cdot10^{-6}$ 1/°C² с точкой перегиба при +18.7°C, рисунок 5. Таким образом, для реализации STW-фильтров с термостабильностью, соизмеримой с ПАВ-фильтрами, в диапазоне температур -60°C до +85°C рекомендуется использовать срез кварца YXls/36°/90° с толщиной пленки Al h_m/λ=1.95-2.23%.



а) б)

Рисунок 5 – а) Изменение средней частоты fcp АЧХ STW фильтра на основе YXls/36°/90° среза кварца (h_m/λ=1.95%) в диапазоне температур от минус 60 до +85°C, ТКЧ(2)=-0.043·10-6 ед./град2; б) зависимость точки перегиба температурно-частотной характеристики от относительной толщины пленки алюминия h_m/λ для YXls/42° … 36°/90° срезов кварца.

Заключение

Разработанные STW-фильтры с полосой пропускания 0.09-0.12% и вносимым затуханием ~4,0 дБ успешно применяются для систем беспроводной связи LPWAN (NB-IoT, LTE-M, LoRaWan), где требуется обработка сигнала с частотой до 1,5 ГГц и узкие полосы пропускания, подтверждая эффективность предложенных решений.

Список литературы

1. *Riisler U., Ruile W., Wagner K.Ch., Johannes T.W., Schol1 G., Weige R.* Energy distribution in a quartz resonator // IEEE Ultrasonics Symposium. 1996. 4P.

2. *Дмитриев В. Ф.* Устройства интегральной электроники: Акустоэлектроника. Основы теории, расчета и проектирования: учеб. Пособие // ГУАП. СПб., 2006.

3. *Гуляев Ю.В., Плесский В.П.* //Письма ЖЭТФ, 1977. Т. 3. С. 22.

4. *Michio Kadota, Toshimaro Yoneda, Koji Fujimoto, Takeshi Nakao and Eiichi Takata*, Very Small-Sized Resonator Filter Using Shear Horizontal Wave on Quartz // JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS. Part 1, No. 5B, 2001. P. 3718-3721.

УДК: 579.6 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39506

Повышение чувствительности измерителя проводимости жидкости на основе резонатора с поперечным электрическим полем

Б.Д. Зайцев[1,a], И.А. Бородина[1], А.А. Теплых[1], А.П. Семёнов[1]

[1] *Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Саратовский филиал. 410019, г. Саратов, ул. Зеленая, д.38.*

E-mail: [a]zai-boris@yandex.ru

Аннотация: Экспериментально исследовано влияние проводящей жидкости на характеристики резонатора с поперечным электрическим полем из керамики ЦТС-19 при изменении ширины зазора между электродами. При заданной ширине зазора измерялись частотные зависимости действительной части электрического импеданса при различной проводимости жидкости для каждого из трех наблюдаемых резонансов. Оказалось, что с ростом проводимости жидкости резонансная частота вначале практически не меняется, затем в интервале 30 – 500 мкСм/см уменьшается и далее остается постоянной. При этом максимальное значение реальной части электрического импеданса уменьшается в диапазоне проводимости 1 - 100 мкСм/см и далее практически не изменяется. Показано, что увеличение ширины зазора увеличивает чувствительность указанных параметров резонатора к изменению проводимости жидкости. Сравнение теоретических зависимостей резонансной частоты и максимального значения реальной части электрического импеданса от проводимости жидкости, полученные методом конечных элементов, показало их качественное соответствие эксперименту. При этом теоретические значения указанных величин оказались несколько больше экспериментальных, что связано с влиянием жидкостного контейнера, который не учитывался в теории.

Ключевые слова: Резонатор с поперечным электрическим полем, резонансная частота, электрический импеданс, проводимость жидкости

Increasing the sensitivity of a liquid conductivity meter based on a resonator with a lateral electric field

B.D. Zaitsev[1,a], I.A. Borodina[1], A.A. Teplykh[1], A.P. Semyonov[1]

[1] *Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics, Russian Academy of Sciences, Saratov Branch. Saratov 410019, Russia.*

E-mail: [a]zai-boris@yandex.ru

Abstract: The influence of a conductive liquid on the characteristics of a lateral electric field resonator made of PZT-19 ceramic was experimentally studied with varying gap widths between the electrodes. At a fixed gap width, the frequency dependences of the real part of the electrical impedance were measured for different liquid conductivities for each of the three observed resonances. It turned out that as the liquid's conductivity increases, the resonant frequency initially does not practically change, then decreases in the range of 30 – 500 μS/cm and then remains constant. At that, the maximum value of the real part of the electrical impedance decreases in the conductivity range of 1 - 100 μS/cm and then remains practically unchanged. It is shown that the growth of the gap width increases the sensitivity of the specified resonator parameters to changes in the conductivity of the liquid. A comparison of the theoretical dependences of the resonant frequency and the maximum value of the real part of the electrical impedance on the conductivity of the liquid, obtained by the finite element method, showed their qualitative agreement with the experiment. Moreover, the theoretical values of the indicated quantities turned out to be somewhat higher than the experimental ones due to the influence of the liquid container, which was not taken into account in the theory.

Keywords: Resonator with lateral electric field, resonant frequency, electrical impedance, liquid conductivity

PACS: 43.20+g

Введение

Известно, что характеристики пьезоэлектрических резонаторов с поперечным электрическим полем зависят от проводимости контактирующей жидкости [1-9], и на этой основе можно разрабатывать измерители проводимости различных жидкостей. В качестве основного параметра резонатора, меняющегося при изменении проводимости жидкости, использовались частота параллельного резонанса [1-5], максимальное значение реальной части электрического импеданса [7] и модуль электрического импеданса или адмиттанса на фиксированной частоте вблизи резонанса [6]. При этом диапазон проводимости с максимальным изменением регистрируемого параметра зависит от диэлектрической проницаемости материала резонатора. Например, для ниобата лития ($\varepsilon \approx 30 – 40$) указанный диапазон составляет 100-10000 мкСм/см, а для керамики ЦТС-19 ($\varepsilon \approx 1000 – 2000$) этот диапазон равен 1 – 100 мкСм/см. Однако датчики проводимости жидкости на основе материалов с невысокой диэлектрической проницаемости также сильно чувствительны к изменению вязкости контактирующей жидкости и ее диэлектрической проницаемости. В

этом плане идеальным является резонатор, созданный на керамике ЦТС-19 [7,8] с поперечными механическими колебаниями. Как показали расчеты и эксперименты характеристики этого датчика слабо зависят от вязкости и диэлектрической проницаемости жидкости. Было также показано, что частота параллельного резонанса и максимальное значение реальной части импеданса увеличиваются при увеличении зазора между электродами для резонатора на основе керамики ЦТС-19 [8]. Целью данной работы явилось экспериментальное и теоретическое исследование чувствительности резонатора на основе керамики ЦТС-19 к изменению проводимости жидкости при увеличении зазора между электродами.

1 Описание датчика и методика эксперимента

Для проведения экспериментов был изготовлен пьезоэлектрический резонатор на основе пластины из керамики ЦТС-19 толщиной 1.9 мм с поперечными размерами 18×20 мм^2. На одной стороне пластины по краям были нанесены два алюминиевых электрода с размерами 7×20 мм^2 и с зазором между ними 4 мм. Полярная ось была ориентирована вдоль стороны 18 мм перпендикулярно зазору между электродами. К внешним краям электродов были приклеены две золотые проволочки диаметром 25 μм с помощью проводящего клея. Был изготовлен жидкостный контейнер диаметром 48 мм и высотой 45 мм из пластика. В основании контейнера было проделано прямоугольное отверстие с размерами 19×21 мм^2, в которое с помощью герметика был вклеен вышеописанный резонатор. К контейнеру были прикреплены две металлические шины толщиной 0.5 мм и шириной 6 мм для связи с анализатором импедансов. К этим шинам были припаяны золотые проволочки резонатора.

Оказалось, что вблизи частот 69, 76 и 101 кГц наблюдаются три параллельных резонанса с хорошим качеством. Исследовались характеристики этих резонансов (резонансная частота и максимальное значение реальной части электрического импеданса R_{max}) при заполнении контейнера проводящей жидкостью с известной проводимостью. В качестве проводящей жидкости использовался раствор хлористого натрия. Проводимость образца жидкости измерялась с помощью кондуктометра HI8733 (“Hanna”, USA). Было изготовлено 9 образцов проводящей жидкости с проводимостью 1, 5, 10, 50, 100, 500, 1000, 5000 и 10000 μS/cm. Каждый раз для измерения в контейнер заливалось одно и тоже количество проводящей жидкости - 10 мл. По измеренным с помощью анализатора импедансов E4990A (Keysight Technologies) частотным зависимостям реальной части электрического импеданса для различных образцов проводящей жидкости были построены зависимости резонансной частоты и максимального значения реальной части электрического импеданса R_{max} от проводимости жидкости для каждого резонанса. Подобная процедура была выполнена для других значений ширины зазора. Уменьшение ширины электрода

проводилось с помощью специального резака под микроскопом. Измерения проводились для следующих значений ширины зазора: 4, 6, 8, 10 и 12 мм.

2 Результаты и их обсуждение

На рис. 1, представлено семейство экспериментальных (*а, б*) и теоретических (*в, г*) зависимостей резонансной частоты (*а, в*) и R_{max} (*б, г*) первого резонанса от проводимости жидкости. Параметром является ширина зазора между электродами. Видно, что для заданной ширины зазора с ростом проводимости жидкости резонансная частота вначале остается практически постоянной, затем в интервале проводимости 30 – 500 μS/cm уменьшается и далее практически не изменяется. В интервале проводимости 500 – 10000 μS/cm все кривые практически сливаются в одну. Из рис. 1*б* и 1*г* видно, что с ростом проводимости жидкости в интервале 1-30 μS/cm R_{max} уменьшается при всех значениях ширины зазора и затем стремится к постоянному значению. При этом R_{max} увеличивается с ростом ширины зазора. В

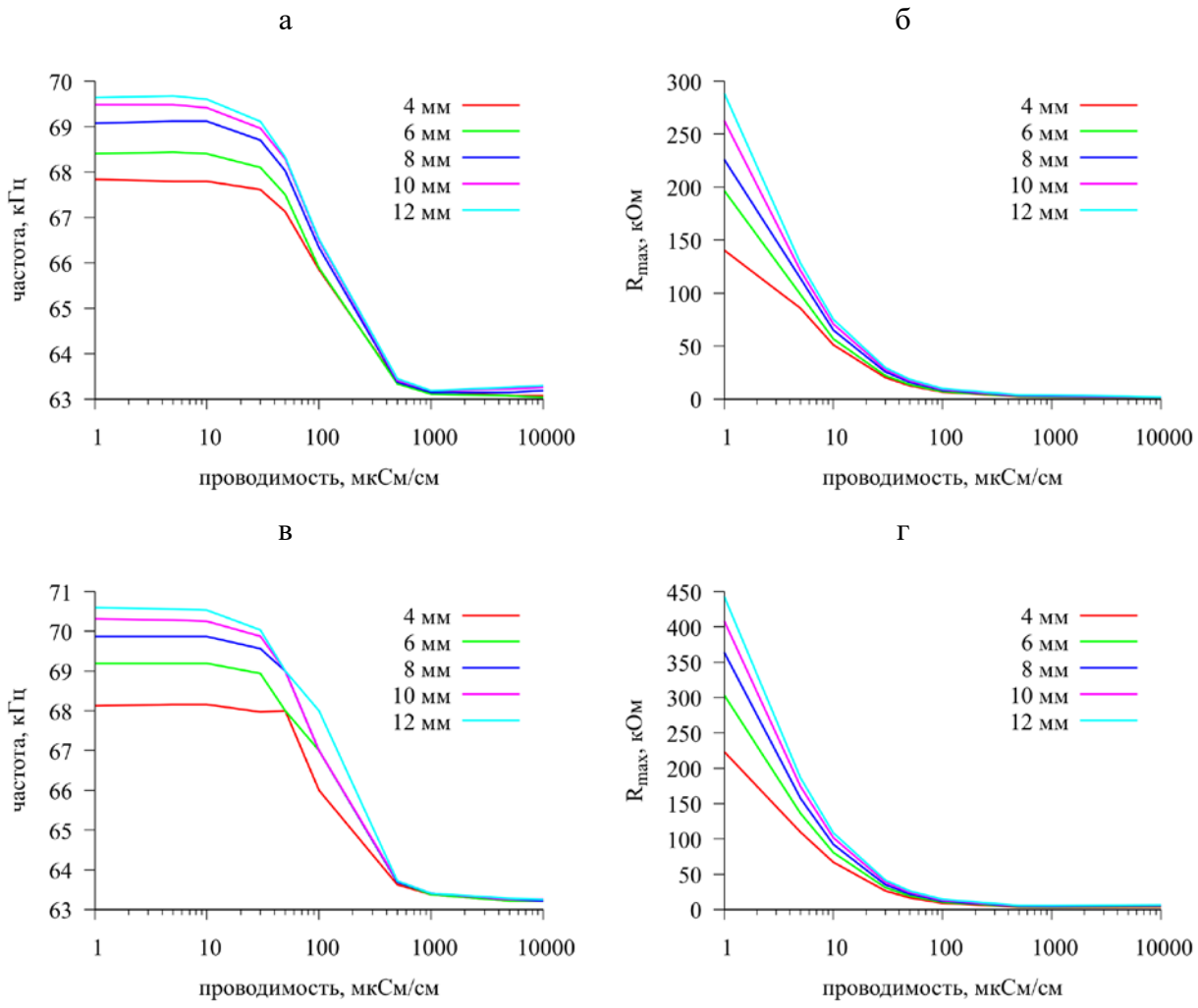


Рис. 1 Экспериментальные (а, б) и теоретические (в, г) зависимости резонансной частоты (а, в) и максимального значения реальной части электрического импеданса R_{max} (б, г) от проводимости жидкости для первого резонанса. Параметром является значение ширины зазора между электродами.

диапазоне проводимости 30-10000 μS/cm все кривые семейства сливаются в одну. Таким образом, теоретические и экспериментальные зависимости для резонансной частоты и R_{max} качественно совпадают, но теоретические значения немного выше экспериментальных.

Аналогичные зависимости представлены на рис. 2 для третьего резонанса. Видно, что

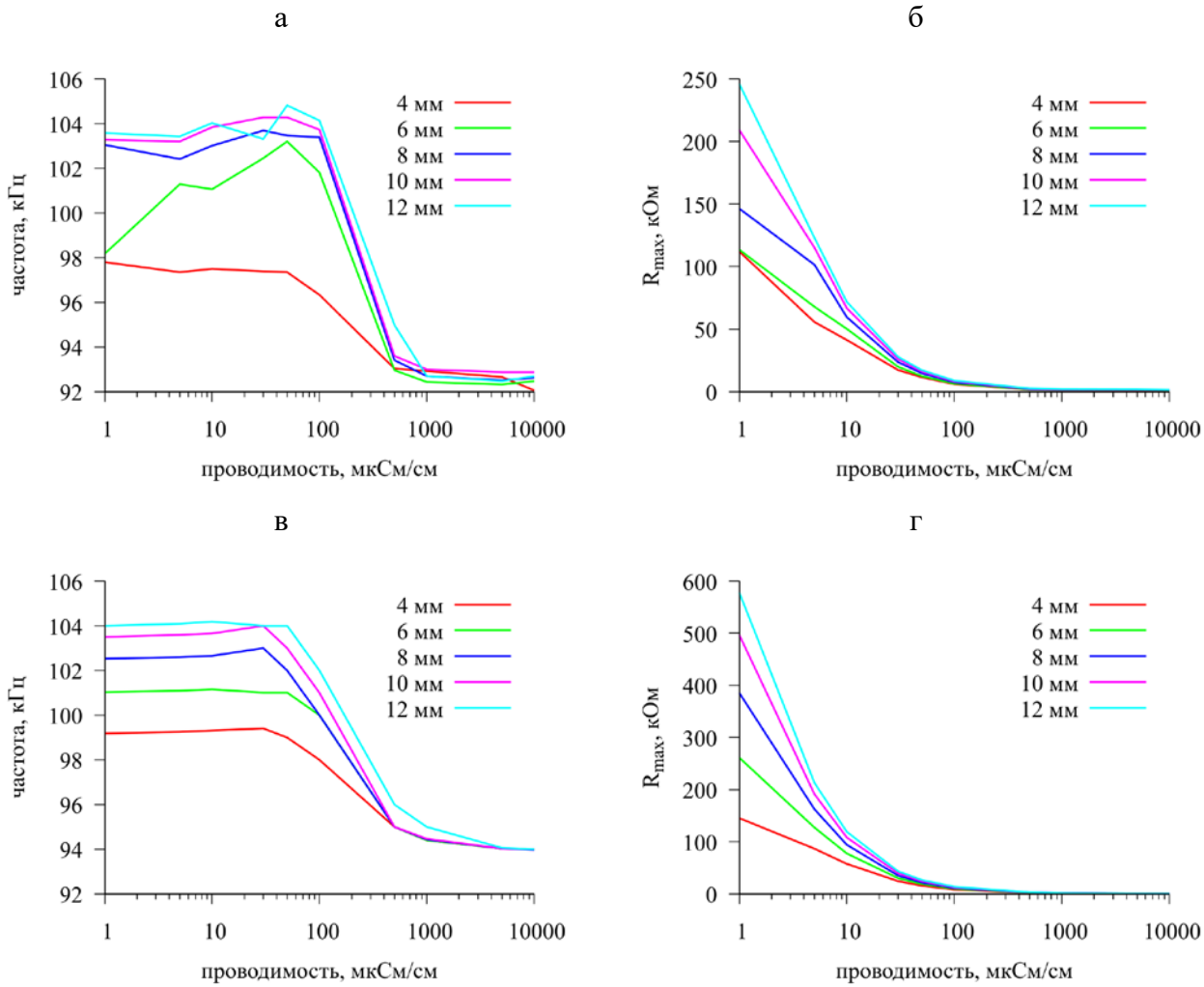


Рис. 2 Экспериментальные (а, б) и теоретические (в, г) зависимости резонансной частоты (а, в) и максимального значения реальной части электрического импеданса R_{max} (б, г) от проводимости жидкости для третьего резонанса. Параметром является значение ширины зазора между электродами.

качественно эти зависимости точно такие же, что и для первого резонанса за исключением экспериментальной зависимости резонансной частоты от проводимости жидкости для зазора 6 мм. В этом случае с ростом проводимости резонансная частота увеличивается, достигает максимума при проводимости 50 мкСм/см и затем спадает до значения 500 мкСм/см. Теоретическая зависимость такого максимума не предсказывает.

Заключение

Показано, что с ростом ширины зазора между электродами увеличивается чувствительность резонансной частоты и максимального значения реальной части импеданса к изменению проводимости жидкости. Это объясняется увеличением крутизны зависимостей

этих параметров от проводимости. Поэтому с точки зрения создания измерителя проводимости жидкости наиболее оптимальным следует признать зазор 12 мм. Соответствующие зависимости на рис. 1 и 2 можно использовать, как калибровочные кривые для определения проводимости в пределах 1 – 500 мкСм/см.

Финансирование.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН (FFWZ -2025-0001).

Список литературы

1. *French L.A.Jr., FitzGerald M., Vetelino J.F*. An equivalent circuit model for a liquid loaded lateral-field excited acoustic wave sensor. // Proc. IEEE Int. Ultrason. Symp. 2011. P. 1194–1199.
2. *Hartz J. S. R., Emanetoglu N. W., Vetelino J. F.* Lateral field excited quartz crystal microbalances for biosensing applications. // Biointerphases. 2020. **15**. 030801.
3. *Ma T., Zhang Z., Wang W., Zhang C., Feng G.* (yxl)21.82_ LiNbO3 pseudo-LFE acoustic wave sensors. // Proc. IEEE Int. Ultrason. Symp. 2009. P. 2511–2514.
4. *Ma T., Wang J., Du J., Yuan L., Zhang Z, Zhang C*. Lateral-field-excited bulk acoustic wave sensors on langasite working on different modes. // IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectr. Freq. Contr. 2013. **60**. P. 864–867.
5. *Xu J., Ma T., Wang J., Yan L., Wang M., Wang Ji., Du J., Zhang C.* Bulk acoustic wave characteristics of pseudo lateral-field-excitation on LGT single crystal for liquid phase sensing, // Sensors. 2019. **19(5)**. 1076.
6. *Zaitsev B. D., Shikhabudinov A. M., Teplykh A. A., Kuznetsova I. E.* Liquid sensor based on piezoelectric lateral electric field excited resonator // Ultrasonics. 2015. **63,** P. 179-183.
7. *Zaitsev B.D., Semyonov A.P., Teplykh A.A., Borodina I.A.* The effect of the conductivity of a film located near piezoelectric resonator with a lateral electric field based on the PZT ceramics on its characteristics // Ultrasonics. 2019. **94**. P. 169–173.
8. *Teplykh A., Zaitsev B., Semyonov A., Borodina I.* The study of the influence of the geometry of a lateral electric field resonator on its resonant characteristics. // Ultrasonics. 2024. **142**. 107386.
9. *Zaitsev B.D., Borodina I.A., Teplykh A.A.* Compact liquid analyzer based on a resonator with a lateral excitation electric field // Ultrasonics. 2022. **126**. 106814.

УДК: 543.424.2. DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39507

Изменение спектра комбинационного рассеяния кристалла танталата лития под воздействием поверхностной акустической волны

А.В. Иржак[a], Д.В. Иржак[b], К.С. Пундиков[c]
Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН, Московская обл, г. Черноголовка, ул. Акалемика Осипьяна, д. 6.
E-mail: [a]airzhak@iptm.ru, [b]irzhak@iptm.ru, [c]kkbhbr2010@yandex.ru

Аннотация: Представлены результаты исследований изменения спектра комбинационного рассеяния света на кристалле танталата лития при воздействии поверхностной акустической волны. Применение метода главных компонент в сочетании с корреляционным анализом для обработки экспериментальных спектров комбинационного рассеяния света позволило выделить вклад в спектр непосредственно связанный с изменением амплитуды акустической волны. В результате продемонстрированы высокая чувствительность спектра комбинационного рассеяния света к изменению амплитуды поверхностной акустической волны и характерные особенности влияния распространения поверхностной акустической волны на различные спектральные линии. Показано, что спектроскопия комбинационного рассеяния света на кристалле, промодулированном поверхностной акустической волны, потенциально может использоваться для прямых локальных измерений амплитуды поверхностных акустических волн в акустоэлектронных устройствах.

Ключевые слова: Спектроскопия комбинационного рассеяния света; Поверхностная акустическая волна; Монокристалл $LiTaO_3$; Метод главных компонент

Change in the Raman spectrum of a lithium tantalate crystal under the surface acoustic wave excitation

A.V. Irzhak[a], D.V. Irzhak[b], K.S. Pundikov[c]

Institute of Microelectronics Technology and High-Purity Materials Russian Academy of Sciences, Ac. Osipian str., 6, Chernogolovka, Moscow District, 142432, Russia
E-mail: [a]airzhak@iptm.ru, [b]irzhak@iptm.ru, [c]kkbhbr2010@yandex.ru

Abstract: The results of a study of changes in the Raman spectrum of a lithium tantalate crystal exposed to a surface acoustic wave are presented. The use of principal component

analysis in combination with correlation analysis to process the experimental Raman spectra made it possible to isolate the contribution to the spectrum directly related to changes in the acoustic wave amplitude. As a result, the high sensitivity of the Raman spectrum to changes in the amplitude of the surface acoustic wave and the characteristic effects of surface acoustic wave propagation on various spectral lines are demonstrated. It is shown that Raman spectroscopy on a crystal modulated by a surface acoustic wave has the potential to be used for direct local measurements of the amplitude of surface acoustic waves in acoustoelectronic devices.

Keywords: Raman spectroscopy, Surface acoustic wave, $LiTaO_3$, Principal component analysis

PACS: 87.64.Je

Введение

В настоящее время для исследования распространения поверхностных акустических волн (ПАВ) непосредственно в акустическом тракте используются методы рентгеновской дифрактометрии и топографии [1-2] и электронной микроскопии [3]. Эти методы позволяют как визуализировать волновое поле ПАВ, так и получать информацию об амплитуде акустической волны. Вместе с тем эти методики обладают рядом ограничений, связанных с принципами формирования изображения в рентгеновском диапазоне длин волн и в электронном микроскопе. В связи с этим расширение экспериментальных методов исследования распространения акустических волн в твердых телах важной задачей.

Спектроскопия КРС широко используется для структурных исследований. Относительно недавно появились сообщения о возможности использования спектроскопии КРС для исследования распространения ПАВ [4-6]. Наиболее заметное влияние на спектр КРС ПАВ оказывает при распространении в монослойном графене [5]. Изменение интенсивности линий КРС достигало 15%, а частотный сдвиг 10 $см^{-1}$. Вместе с тем при исследованиях на монокристаллах было обнаружено очень незначительное изменение амплитуды и положения пиков КРС при воздействии ПАВ. Так, при распространении ПАВ в монокристаллах Si и GaN изменение интенсивностей и частотного сдвига линий КРС составляло величину порядка 0.1% и 0.15 $см^{-1}$, соответственно [4]. В ходе исследования стоячих поверхностных волн в резонаторе на основе кристалла GaAs было обнаружено, что наличие стоячей поверхностной волны с амплитудой 3 нм вызывает как уширение, так и смещение линий КРС на величины 0.2 $см^{-1}$ и 0.4 $см^{-1}$, соответственно [6]. Такие значения изменений характеристик линий КРС находятся на пределе возможностей коммерчески

доступных спектрометров КРС, что делает затруднительным исследования характеристик ПАВ-структур с использованием этой методики.

Применение метода главных компонент в сочетании с корреляционным анализом [7-9] для обработки экспериментальных спектров КРС позволяет выделить вклад в спектр непосредственно связанный с контролируемым воздействием, в данном случае - с изменением амплитуды акустической волны. Таким образом, обнаружение эффектов, связанных с влиянием распространения ПАВ на спектры КРС, в акусто-электронных кристаллах должно быть более простым с точки зрения экспериментальной техники.

Материалы и методы

Исследования проводились на X-112°Y срезе монокристалла $LiTaO_3$, на поверхности которого была сформирована структура встречно-штыревого преобразователя для возбуждения бегущей ПАВ с длиной волны Λ=4 мкм. Апертура ВШП составляла W=55Λ, число пар штырей N=50, коэффициент металлизации S=0.5. Возбуждение ПАВ осуществлялось с использованием высокочастотного генератора RIGOL DSG815. Амплитуда электрического сигнала изменялась от 0 до 2.24 В при резонансной частоте возбуждения 826 МГц, что соответствует скорости распространения ПАВ V=3304 м/с.

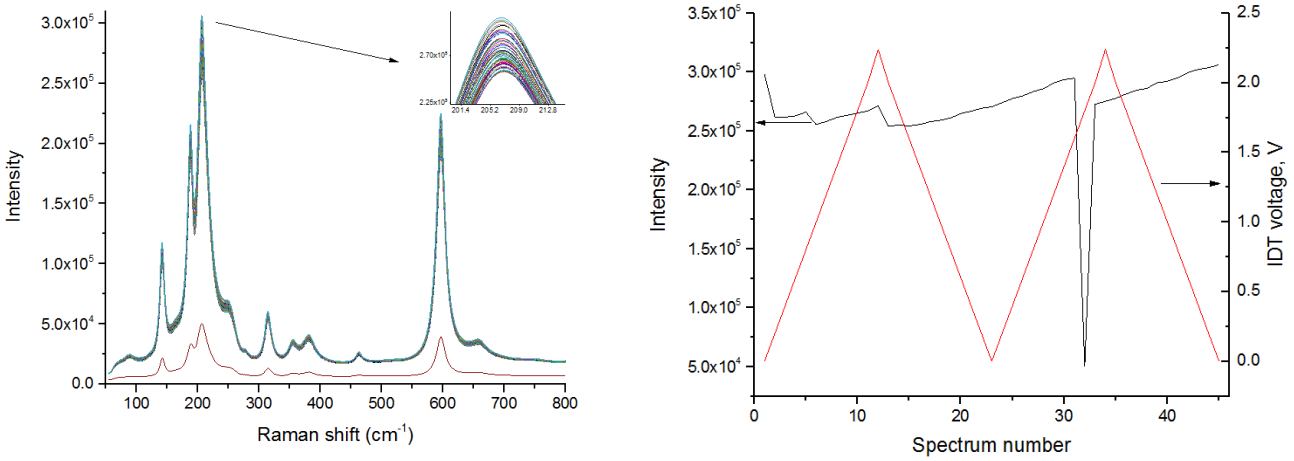
Спектры КРС были получены с помощью рамановского микроскопа BRUKER SENTERRA, работающего на длине волны лазера 532 нм. Мощность лазера составляла 5 мВт, размер пятна лазера 1,0 мкм; экспозиция в каждой точке проводилась 5 раз с задержкой в 5 секунд и последующим усреднением. Расстояние между ВШП и точкой съемки спектров составляло 100 мкм. Спектральный диапазон составлял 50–1540 $см^{-1}$. Спектры регистрировались с помощью объектива 50x MPlan N50x/0.75 без фильтров. В качестве детектора использовалась дифракционная решетка с 1200 линиями/мм и спектральным разрешением 3–5 $см^{-1}$. Всего было получено 45 неполяризованных спектров КРС при циклично изменявшихся амплитудах высокочастотного сигнала $\boldsymbol{U}$, подаваемого на ВШП для возбуждения ПАВ, (0 В $\rightarrow$2.24 В $\rightarrow$0 В $\rightarrow$2.24 В $\rightarrow$0 В).

Для измерения амплитуды ПАВ использовался метод рентгеновской дифрактометрии с последующим моделированием на основе уравнений Такаги-Топэна дифракционных спектров кристалла танталата лития промодулированного ПАВ. Подробное описание процедуры изменений амплитуды ПАВ для исследовавшегося образца были опубликованы ранее [10]. На основе проведенных расчетов был определен коэффициент пропорциональности между амплитудой высокочастотного сигнала и амплитудой ПАВ: K=0.714·10^{-10} м/В. Таким образом, в данном исследовании максимальная амплитуда ПАВ составляла 1.6 Å, что существенно меньше амплитуд стоячих поверхностных акустических волн, влияние которых на изменение спектров КРС исследовалось ранее [5, 6], и где

изменения спектров КРС вследствие распространения ПАВ заметны без применения специальных методов обработки экспериментальных данных.

Результаты исследований

Спектры КРС X-среза кристалла $LiTaO_3$, промодулированного ПАВ, полученные при различных амплитудах высокочастотного сигнала на ВШП представлены на рисунке 1а. Видно, что спектры имеют различную интенсивность пиков и фон. Так же в наборе экспериментальных данных имеется спектр с существенно меньшей интенсивностью. На рисунке 1б представлено сравнение изменения интенсивности спектральной линии с максимумом 207 $см^{-1}$ с изменением амплитуды высокочастотного сигнала, прикладываемого к ВШП для возбуждения ПАВ. Видно, что какая-либо корреляция между этими сигналами отсутствует.



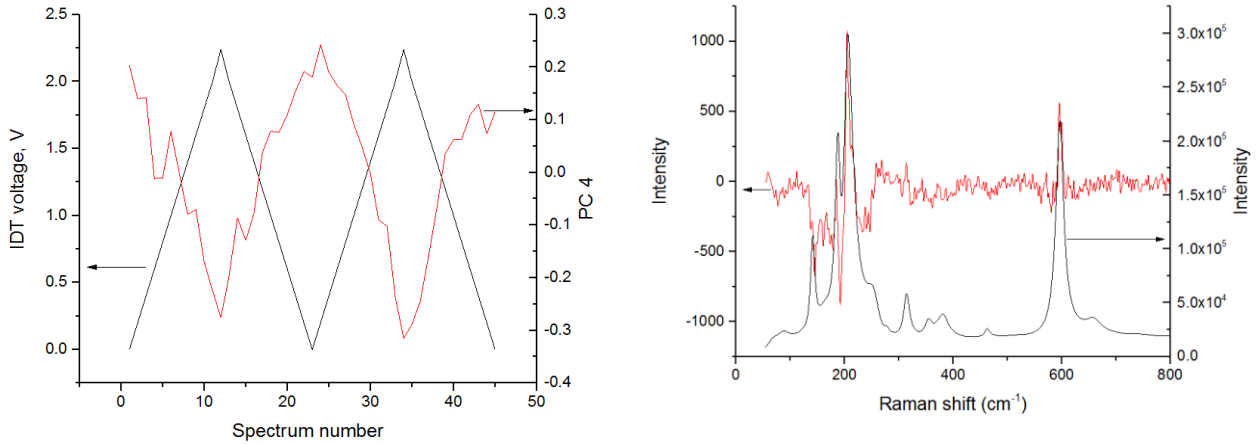
а б

Рисунок 1 - а) спектры КРС X-среза кристалла $LiTaO_3$, промодулированного ПАВ, полученные при различных амплитудах высокочастотного сигнала на ВШП; б) сравнение изменения интенсивности спектральной линии с максимумом 207 $см^{-1}$ с изменением амплитуды высокочастотного сигнала

Для выделения изменений в спектрах КРС, вызванных изменениями амплитуды ПАВ, для анализа спектрометрических данных использовались анализ главных компонентов и корреляционный анализ. Суть подхода заключается в том, что после разложения матрицы экспериментальных данных на главные компоненты осуществляется поиск корреляции главных компонентов с зависимостью изменения амплитуды ПАВ. Наличие статистически значимой корреляции между изменениями амплитуды ПАВ и любым из главных компонентов будет означать, что изменение амплитуды ПАВ влияет на спектр КРС. Характер изменения спектра будет определяться нагрузкой, соответствующей главному компоненту. При уровне значимости $\alpha = 0{,}05$ и размере выборки $N = 45$ коэффициент корреляции Пирсона, удовлетворяющий критерию статистической значимости, должен быть

$|r| \geq 0{,}294$ [11]. Это значит, что данный объем выборки позволяет обнаружить наличие даже слабой зависимости изменения спектра КРС от амплитуды ПАВ [12].

На рисунке 2а представлено сравнение найденной главной компоненты с изменением амплитуды высокочастотного сигнала, прикладываемого к ВШП для возбуждения ПАВ. Коэффициент корреляции составляет -0.93, что указывает на сильную связь изменения спектров, описываемого данной компонентой с изменением амплитуды ПАВ. Соответствующая найденной главной компоненте нагрузка представлена на рисунке 2б. Вклад найденной компоненты в общие изменения спектров КРС, зафиксированные в ходе измерений, составляет $4.4 \cdot 10^{-4}$%.



а б

Рисунок 2 - а) сравнение найденной главной компоненты с изменением амплитуды высокочастотного сигнала, прикладываемого к ВШП для возбуждения ПАВ; б) нагрузка, соответствующая найденной главной компоненте (красная линия) в сравнении со спектром КРС

Изменения спектра проявляются в виде изменения интенсивности или в сдвиге максимума спектральных линий. Изменение напряжения на ВШП может быть пересчитано в амплитуды ПАВ и полученная зависимость может быть использована для диагностики других ПАВ-приборов на аналогичном кристалле. Таким образом, применение спектроскопии КРС в сочетании со статистическими методами обработки экспериментальных данных является мощным инструментом для локальной диагностики приборов на ПАВ.

Работа выполнена в рамках госзадания № 075-00296-26-00

Список литературы

1. I. A. Schelokov, D. V. Roshchupkin, D. V. Irzhak and R. Tucoulou "Dynamical theory for calculations of X-ray spectra from crystals modulated by surface acoustic waves" J. Appl. Cryst. (2004). 37, 52-61,

2. D. V. Roshchupkin, H. D. Roshchupkina and D. V. Irzhak, "X-ray topography analysis of acoustic wave fields in the SAW-resonator structures," IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 52, no. 11, pp. 2081-2087, Nov. 2005,

3. D. Roshchupkin, E. Emelin, O. Plotitcina, A. Mololkin, O. Telminov, Scanning Electron Microscopy Investigation of Surface Acoustic Wave Propagation in a 41° YX-Cut of a LiNbO3 Crystal/Si Layered Structure. Crystals 2021, 11, 1082

4. Iikawa, F.; Hernández-Mínguez, A.; Ramsteiner, M.; Santos, P. V. Optical phonon modulation in semiconductors by surface acoustic waves. Physical Review B, (2016) 93(19), 195212,

5. R. Fandan, J. Pedrós, A. Hernández-Mínguez, F. Iikawa, P. V. Santos, A. Boscá, F. Calle, Dynamic Local Strain in Graphene Generated by Surface Acoustic Waves, Nano Letters 2020 20 (1),

6. B. D. Rummel, L. Miroshnik, M. Patriotis, A Li, T. R. Sinno, M. D. Henry, G. Balakrishnan, S. M. Han; Imaging of surface acoustic waves on GaAs using 2D confocal Raman microscopy and atomic force microscopy. Appl. Phys. Lett. 18 January 2021; 118 (3): 031602.

7. A. Irzhak, D. Irzhak, V. Khvostikov, K. Pundikov, D. Roshchupkin, R. Fahrtdinov, Effect of local changes in the composition of the LiNb1−xTaxO3 single crystal on the Raman spectra, J Raman Spectrosc 2022, 53(5), 969.

8. A. Irzhak, D. Irzhak, K. Pundikov, A. Sergeev, Changing of LiNbO3 Raman spectra under external electric field applying, Optical Materials,2022, Volume 133, 112988,

9. A. Irzhak, D. Irzhak, O. Kononenko, K. Pundikov, D. Roshchupkin, Changes in the Raman Spectrum of Monolayer Graphene under Compression/Stretching Strain in Graphene/Piezoelectric Crystal Structures. Nanomaterials 2023, 13, 350.

10. D. Irzhak, K. Pundikov, D. Roshchupkin, Measuring of the surface acoustic wave amplitude in the X-112° Y-cut of a LiTaO3 crystal using X-ray diffraction at the laboratory X-ray source, Materials Letters, Volume 374, 2024, 137191,

11. S. B. Hulley, S. R. Cummings, W. S. Browner, D. Grady, T.B. Newman, Designing clinical research: an epidemiologic approach. 4th ed. PA: Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia 2013.

12. Cohen, J. Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences (2nd ed.). Lawrence Erlbaum Associates Publishers, Hillsdale, NJ, 1988.

УДК: 621.372.63 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39508

Исследование методов повышения допустимой входной мощности фильтров на ПАВ

М.О. Машинин[1,a], А.С. Груздев[1,b]

[1] *ООО «БУТИС». Г. Москва, Волгоградский просп., д. 42, корп. 5*

E-mail: [a]m.mashinin@butis.ru, [b]a.gruzdev@butis.ru

Аннотация: Работа посвящена исследованию методов повышения допустимой входной мощности радиочастотного сигнала на входе ПАВ-фильтров, применяемых во входных трактах современной радиоэлектронной аппаратуры. Показано, что использование импедансных структур с увеличенной площадью преобразователей позволяет повысить допустимую мощность в 10 раз, применение диэлектрической пленки SiO_2 толщиной не менее 20 нм увеличивает этот параметр до 8 раз, а использование многослойной металлизации (Ti/Al/Ti/Al, V/Al) повышает устойчивость в 5-10 раз.

Ключевые слова: фильтр на поверхностных акустических волнах, допустимая входная мощность, диэлектрическое покрытие, многослойная металлизация.

Methods to Enhance the Power Handling of SAW Filters

M.O. Mashinin[1,a], A.S. Gruzdev[1,b]

[1] *BUTIS LLC, Moscow, Volgogradsky prospekt, 42, b. 5, 109316, Russia*

E-mail: [a]m.mashinin@butis.ru, [b]a.gruzdev@butis.ru

Abstract: The paper is devoted to the study of methods for increasing the allowable input power of a radio-frequency (RF) signal at the input of surface acoustic wave (SAW) filters used in the front-end stages of modern radio electronic equipment. Results show that the use of impedance-type structures with an increased transducer area makes it possible to increase the allowable power by up to 10 times. The application of a SiO_2 dielectric film with a thickness of at least 20 nm increases this parameter by up to 8 times, while the use of multilayer metallization (Ti/Al/Ti/Al, V/Al) improves stability by 5–10 times.

Keywords: surface acoustic wave filter, RF power handling, dielectric coati ng, multilayer metallization.

PACS: 12.20.Fv

Введение

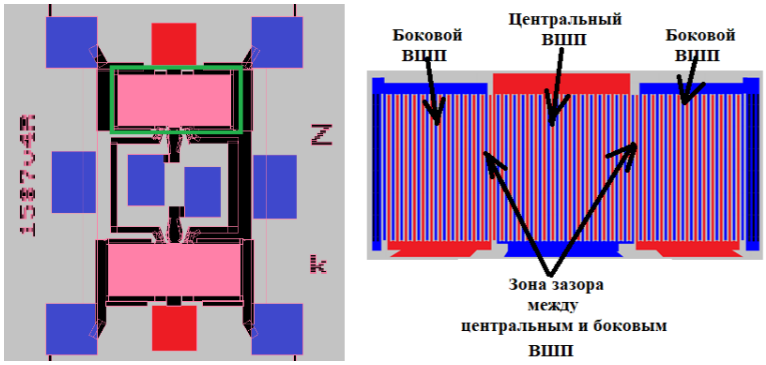
Современные системы беспроводной связи характеризуются увеличением уровней передаваемой мощности и усложнением архитектуры радиочастотных трактов. Это приводит к повышению требований к элементам частотной селекции, в частности к фильтрам на поверхностных акустических волнах (ПАВ). ПАВ-фильтры широко применяются благодаря возможности обработки РЧ сигналов любой сложности, компактности и технологичности. Однако при увеличении мощности входного сигнала проявляются ограничения, связанные с деградацией электродных структур, в частности встречно-штыревых преобразователей (ВШП), вызванной электромиграцией и тепловыми эффектами [1].

Целью данной работы является исследование и экспериментальное подтверждение методов повышения допустимой входной мощности ПАВ-фильтров диапазона частот 1.5-1.6 ГГц.

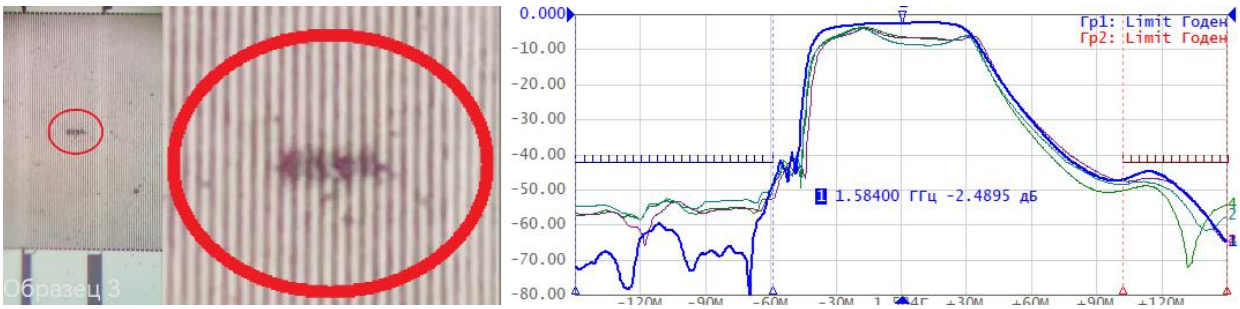
1 Физические ограничения ПАВ-фильтров при высоких уровнях мощности

При воздействии радиочастотного сигнала повышенной мощности на ПАВ фильтр происходит локальный перегрев активной области встречно-штыревого преобразователя (ВШП), что обусловлено конечной теплопроводностью пьезоэлектрических материалов, а также ограниченным объемом корпуса. Данный эффект вызывает электромиграцию атомов металла, из которого сформирована электродная структура ВШП, что приводит при длительном воздействии к короткому замыканию между электродами противоположной полярности. При малом числе электродов в ВШП напряженность поля в межэлектродных промежутках увеличивается, что вызывает эффект акустомиграции с последующей необратимой деформацией электродных структур. С ростом рабочей частоты ПАВ фильтра условия для возникновения данного эффекта возрастают. Также большой градиент температуры при эксплуатации ПАВ фильтров, реализованных на основе пироэлектрических подложек из танталата и ниобата лития, вызывает накопление электрических зарядов на поверхности подложки, что приводит к электрическому пробою преобразователя.

На рис. 1, а, в качестве примера влияния вышеперечисленных эффектов на ПАВ фильтр, показана конструкция на основе продольно-связанных резонаторов, характерной особенностью которой является малое количество электродов в центральном ВШП, на который подается РЧ сигнал. Исследования показали, что на частоте 1587 МГц данная конструкция обеспечивает допустимую мощность входного сигнала не более 25 мВт**,** после чего наблюдается деградация электродной структуры центрального ВШП (рис. 1, б) с соответствующим искажением амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) фильтра, рис. 1, в.



а)



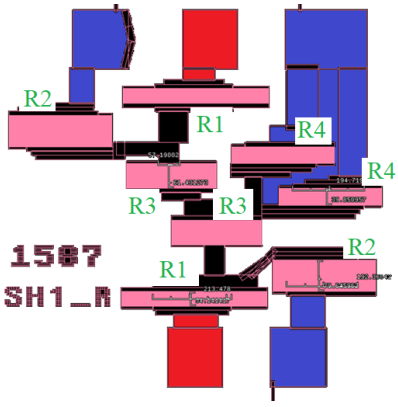
б) в)

Рис. 1 – Топология ПАВ фильтра на основе продольно-связанных резонаторов (а); б) выгорание электродной структуры центрального ВШП при воздействии РЧ сигнала мощностью 50 мВт; в) АЧХ фильтра: синяя линия – 25 мВт, остальные линии – при уровне мощности свыше 25 мВт.

2 Методы повышения допустимой входной мощности

2.1 Топологическая модификация

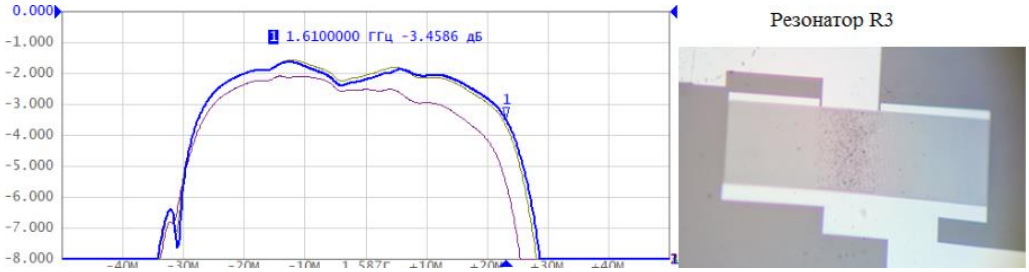
Известно, что ПАВ фильтры импедансного типа, имеющие большую протяженность электродных структур ВШП, рис. 2, являются наиболее пригодным типом конструкций для обработки РЧ сигналов повышенной мощности [2]. Результаты тестирования данной конструкции на частоту 1587 МГц показали, что она обеспечивает обработку РЧ сигнала мощностью не менее 50 мВт, что превышает показатели для конструкции на основе продольно-связанных резонаторов в 2 раза.



Площадь преобразователей, мкм^2			
R1	R2	R3	R4
7242	13588	3477	7566

Рис. 2 – Топология ПАВ фильтра импедансного типа.

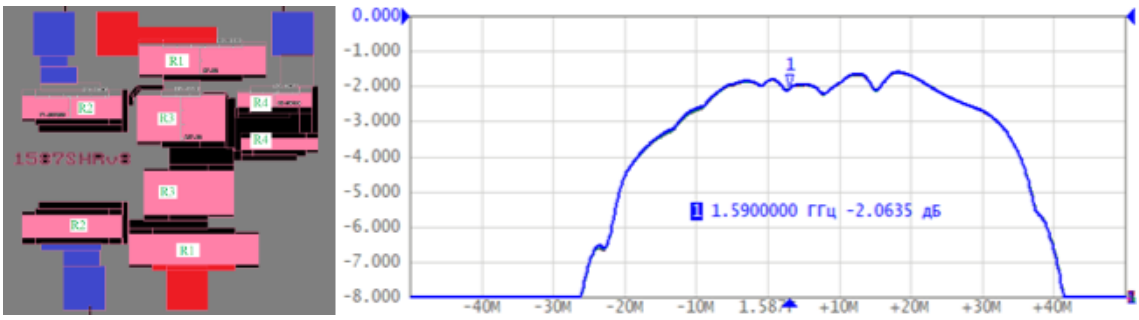
При повышении мощности входного сигнала до 100 мВт начинает разрушаться электродная структура преобразователя резонатора R3, который имеет минимальную площадь электродной структуры, в результате чего происходит деградация АЧХ фильтра в полосе пропускания, рис. 3.



а) б)

Рис. 3 – Изменение АЧХ фильтра импедансного типа при воздействии входного РЧ сигнала мощностью 1.0 мВт, 50 мВт, 100 мВт (а); б) разрушение электродной структуры ВШП резонатора R3 в результате воздействия РЧ сигнала повышенной мощности.

Использование модернизированного варианта топологии фильтра с увеличенной площадью ВШП резонатора R3 за счет последовательного включения двух идентичных преобразователей (рис. 4) позволило значительно снизить напряженность поля в зазорах преобразователя и, как следствие, увеличить допустимый уровень входной мощности до 500 мВт, что в 10 раз выше по сравнению с базовой конструкцией.



а) б)

Площадь преобразователей, мкм^2			
R1	R2	R3	R4
27548	20382	21352	13376

Рис. 4 – Топология модернизированного фильтра импедансной конструкции; б) АЧХ модернизированного фильтра при воздействии входного РЧ сигнала с уровнем мощности
1.0 мВт, 100 мВт, 200 мВт, 300 мВт, 400 мВт, 500 мВт.

2.2 Применение диэлектрической пленки SiO_2

Использование диэлектрического покрытия из диоксида кремния [3] также позволило уменьшить эффект электромиграции за счет подавления поверхностной диффузии атомов Al. Для проведения исследований по определению влияния диэлектрической пленки SiO_2 разной

толщины (10 нм, 15 нм и 20 нм) на эксплуатационные характеристики ПАВ фильтра была использована базовая конструкция импедансного типа, показанная на рис. 2. Результаты исследований представлены на рис. 5. Из графиков видно, что максимальную защиту от эффекта электромиграции атомов алюминия обеспечивает пленка SiO_2 толщины 20 нм, при которой допустимый уровень входной мощности (выделено красным) увеличился в 8 раз.

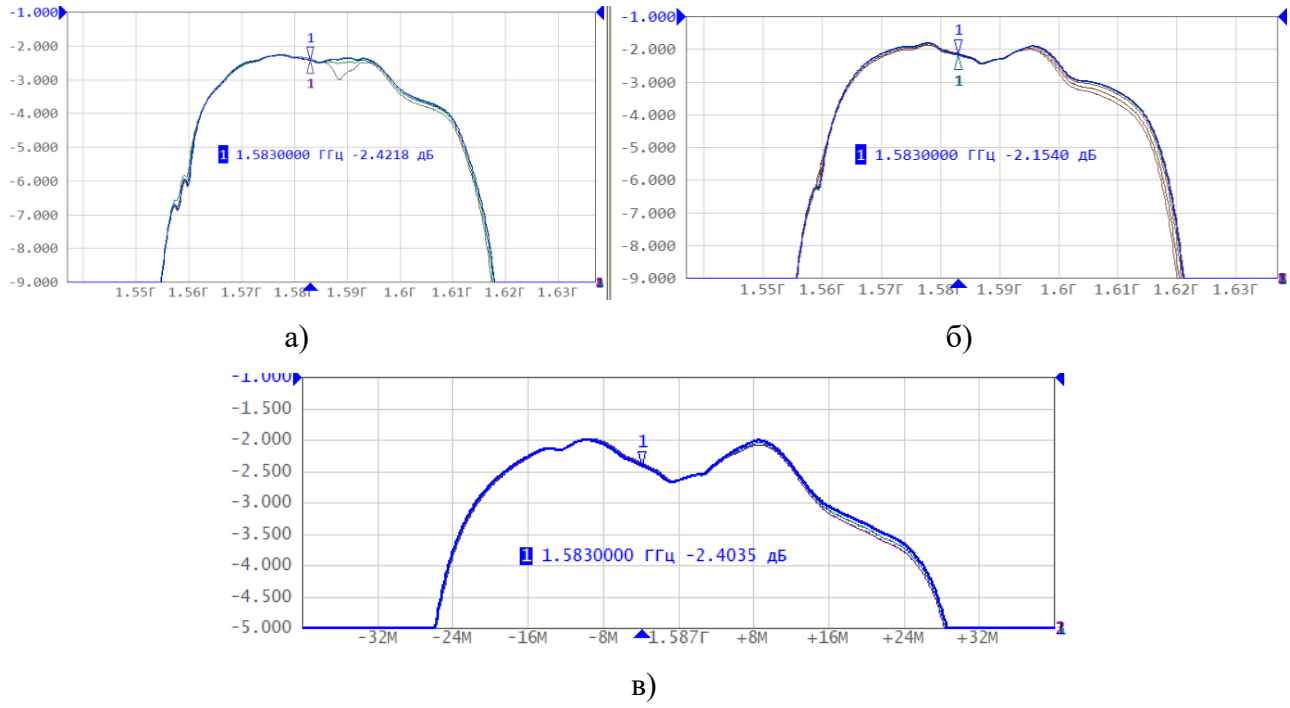
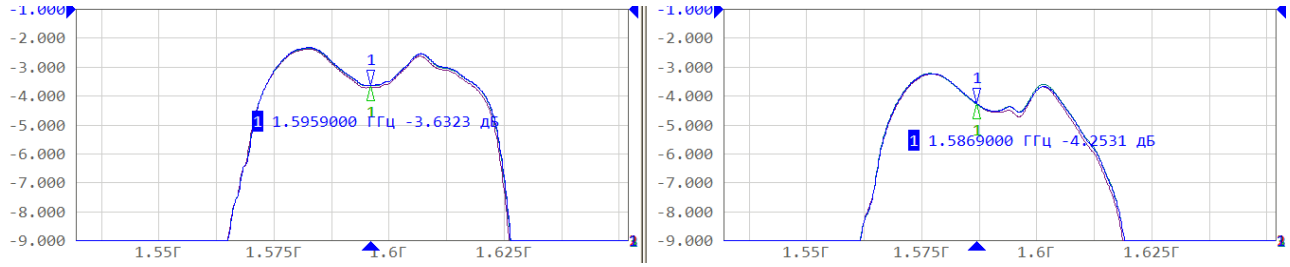


Рис. 5 – Изменение АЧХ импедансного ПАВ фильтра при воздействии РЧ сигнала различной мощности: а) толщина пленки SiO_2 10 нм, уровни мощности 1.0 мВт, 50 мВт, 100 мВт, 150 мВт, 200 мВт, 250 мВт; б) толщина пленки SiO_2 15 нм, уровни мощности 1.0 мВт, 50 мВт, 100 мВт, 150 мВт, 200 мВт, 250 мВт, 300 мВт; в) толщина пленки SiO_2 20 нм, уровни мощности 1.0 мВт, 450 мВт, 500 мВт.

2.3 Многослойная металлизация электродов

Перспективным методом повышения допустимой входной мощности также является применение многослойных электродных структур [4] типа Ti/Al/Ti/Al или V/Al, что обеспечивает повышение механической прочности электродов и снижает эффект электромиграции. В данной работе исследовалось влияние четырехслойной структуры Ti-200Å/Al-653Å/Ti-200Å/Al-900Å, а также двухслойной структуры V-150Å/Al-1900Å на эксплуатационные характеристики базовой конструкции (рис. 2). Результаты исследований представлены на рис. 6, где красным выделен допустимый уровень входной мощности, при котором отсутствуют изменения АЧХ фильтра.



а) б)

Рис. 6 – Изменение АЧХ импедансного ПАВ фильтра при воздействии РЧ сигнала различной мощности: а) многослойная структура Ti-200Å/Al-653Å/Ti-200Å/Al-900Å, уровни мощности 1.0 мВт, 500 мВт; 600 мВт; б) многослойная структура V-150Å/Al-1900Å, уровни мощности 1.0 мВт, 250 мВт, 300 мВт.

Заключение

В работе исследованы методы повышения допустимой входной мощности импедансных ПАВ-фильтров диапазона частот 1.5-1.6 ГГц По результатам исследований установлено, что конструкции с увеличенной площадью преобразователей позволяют повысить допустимую мощность до 10 раз; применение пленки SiO_2 толщиной ≥ 20 нм увеличивает допустимую мощность до 8 раз; многослойная металлизация обеспечивает повышение устойчивости к мощным входным сигналам в 5-10 раз. Также стоит отметить, что возможно комплексное применение исследованных методов для достижения наилучших результатов в контексте повышения устойчивости к мощности ПАВ-фильтров.

Список литературы

1. *Gruenwald R.* RF power handling of SAW devices: white paper / Vectron International GmbH. – Teltow (Germany), 2015. – 10 p.

2. *Багдасарян А. С., Синицына Т. В., Машинин О. В., Егоров Р. В.* СВЧ-фильтры на ПАВ с высокой входной мощностью для систем и аппаратуры передачи и обработки информации // Труды НИИР. – 2016. – № 1. – С. 26–35.

3. *Гарифулина А.Т.* Исследование влияния защитных пленок SiO_2 на стойкость ПАВ-фильтров к воздействию радиочастотных сигналов большой мощности // XXVII научно-техническая конференция «Вакуумная наука и техника»: материалы конф. – Судак, 14–19 сент. 2020 г. – С. 168–172.

4. *Li Q., Fu S., Wang R., Song C., Zeng F., Pan F.* Enhanced power durability of surface acoustic wave filter with Al/Ti/Cu/Ti electrodes // Journal of Alloys and Compounds. – 2018. – Vol. 740. – P. 222–228. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.01.049.

УДК: 539.3 . DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39509

Термодинамическая модель танталата лития

В.Б. Широков[1,2], П.Е. Тимошенко[2], В.В. Калинчук[1]

[1] *Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук, 344006 Ростов-на-Дону, пр. Чехова 41*

[2] *Южный федеральный университет, 344006 Ростов-на-Дону. ул. Б. Садовая 105*

E-mail: [a]vkalin415@mail.ru, [b]p.e.timoshenkp@yandex.ru, [c]vbshirokov@rambler.ru

Аннотация: Построена термодинамическая модель танталата лития, основанная на использовании потенциала Ландау шестой степени, у которого коэффициент при квадрате поляризации вдоль тригональной оси нелинейно зависит от температуры. Такой потенциал, по сравнению с традиционно используемым потенциалом четвертой степени, позволяет с большей степенью адекватности описать зависимость спонтанной поляризации и компонент вектора деформации от температуры, что подтверждается хорошим согласованием их расчетного поведения с экспериментальными результатами. Использование представленного в литературе комплекта экспериментальных значений материальных постоянных линейных уравнений пьезоэффекта, а также некоторых электрооптических и акустооптических постоянных, позволяет определить полный набор коэффициентов рассматриваемого потенциала Ландау. С его помощью построены функциональные зависимости всех материальных постоянных от температуры. Анализ показал, что, часть материальных постоянных, прежде всего упругих, демонстрируют термостабильность вплоть до 600К. Часть пьезоэлектрических, электрооптических и акустооптических коэффициентов в этом диапазоне также являются термостабильными. В то же время значительная часть указанных констант в диапазоне T>600К демонстрирует значительную зависимость от температуры. Представленные результаты могут представлять интерес при проектировании микро- и наноэлектронной, электрооптической и акустооптической аппаратуры.

Ключевые слова: танталат лития, термодинамический потенциал Ландау, материальные константы линейных уравнений пьезоэффекта, электрооптические константы, акустооптические константы**.**

Thermodynamic Model of Lithium Tantalate

V.B. Shirokov[1,2], P.E. Timoshenko[2], V.V. Kalinchuk[1]

[1] *Federal Research Center Southern Scientific Center*

[1] *Russian Academy of Sciences, 41 Chekhov Ave., Rostov-on-Don, 344006, Russia*

[2] *Southern Federal University, 105 B. Sadovaya St., Rostov-on-Don, 344006, Russia*

E-mail: [a]vkalin415@mail.ru, [b]p.e.timoshenkp@yandex.ru, [c]vbshirokov@rambler.ru

Abstract: A thermodynamic model of lithium tantalate is constructed based on the sixth-degree Landau potential, in which the coefficient of the squared polarization along the trigonal axis

depends nonlinearly on temperature. This potential, compared to the traditionally used fourth-degree potential, allows for a more adequate description of the temperature dependence of spontaneous polarization and strain vector components, as confirmed by good agreement between their calculated behavior and experimental results. Using a set of experimental valuesof the material constants of the linear equations of the piezoelectric effect, as well as some electro-optic and acousto-optic constants, presented in the literature, allows us to determine the complete set of coefficients of the Landau potential under consideration. Using this set, functional dependences of all material constants on temperature are constructed. As follows from the obtained results, some material constants, primarily elastic ones, exhibit thermal stability up to 600 K. Some piezoelectric, electro-optic, and acousto-optic coefficients are also thermally stable in this range. At the same time, a significant portion of these constants in the range T>600 K exhibit a significant temperature dependence. The presented results may be of interest in the design of micro- and nanoelectronic electro-optical and acousto-optical equipment.

Keywords: lithium tantalate, Landau thermodynamic potential, material constants of linear piezoelectric equations, electro-optical constants, acousto-optical constants.

Введение

Танталат лития относится к классу многофункциональных материалов с пьезоэлектрическими, электрооптическими и нелинейно-оптическими свойствами, благодаря которым он широко используется в электронике, оптических коммуникаторах, интегрированной фотонике, акустооптических системах и других областях. Успешное использования разработанных на его базе активных элементов микроэлектронных устройств невозможно без предварительных расчетов с использованием материальных постоянных. Многочисленные экспериментальные исследования по определению материальных постоянных танталата лития выполнены при комнатной температуре [1, 2]. Они позволяют проводить вычисления физических свойств для срезов монокристаллов различной ориентации. Современный уровень технологий приводит к необходимости учета поведения материальных констант в широком диапазоне изменения внешних условий (температура, давление, электрическое поле, деформация). Использование в данном случае коэффициентов линейных уравнений пьезоэффекта не совсем корректно, поскольку для нелинейных кристаллов эти константы существенно зависят от внешних условий [3]. Проведение экспериментальных исследований в этом направлении сопряжено с большими материальными затратами. Влияние внешних воздействий на поведение материальных постоянных удобно описывать путем использования нелинейного потенциала теории Ландау фазовых переходов. В работе [4] использован потенциал четвертой степени, который позволяет описывать поведение кристалла танталата лития при комнатной температуре. В настоящей работе для

танталата лития предложен термодинамический потенциал Ландау шестой степени, константы которого определены на основе экспериментальных данных. Численный анализ подтвердил хорошее согласование рассчитанного на его базе температурного поведения спонтанной поляризации и компонентов вектора деформации с экспериментальными результатами. Проведен детальный численный анализ температурного поведения полного комплекта материальных констант уравнений пьезоэффекта для танталата лития, а также констант его электрооптического и акустооптического эффектов.

1 Новое представление термодинамического потенциала танталата лития

В рассмотрение вводится декартова прямоугольная система координат x_1, x_2, x_3. Ось x_3 направлена вдоль оси третьего порядка кристалла, а одна из плоскостей отражения ортогональна оси x_1. Базис инвариантов в этой системе, построенный на компонентах вектора поляризации $\mathbf{P}=(p_1, p_2, p_3)$, состоит из четырех функций

$$\begin{aligned} J_1 &= p_1^2 + p_2^2, \\ J_2 &= p_3^2, \\ J_3 &= p_2^2\left(3p_1^2 - p_2^2\right)^2, \\ I_4 &= p_2 p_3\left(3p_1^2 - p_2^2\right). \end{aligned} \tag{1}$$

Первые три инварианта из представления (1) являются независимыми, последний инвариант I_4 входит в линейный базис. В работе [4] был предложен потенциал четвертой степени, который позволяет описывать поведение кристалла танталата лития при комнатной температуре. Однако он теряет свою эффективность при расширении температурного диапазона. В настоящей работе предлагается рассмотреть новое представление термодинамического потенциала танталата лития в виде ряда шестой степени по компонентам поляризации

$$\begin{aligned} Fp = {} & a_1 J_1 + a_2 J_2 + a_{11} J_1^2 + a_{12} J_1 J_2 \\ & + a_{22} J_2^2 + a_4 I_4 + a_{122} J_1 J_2^2 + a_{222} J_2^3 \end{aligned} \tag{2}$$

В представлении (2) отсутствуют слагаемые шестой степени $J_1^2 J_2$, J_3, $I_1 J_1$, $I_1 J_2$, которые не существенны для описания экспериментальных свойств танталата лития. В этом случае термодинамический потенциал Гиббса F танталата лития можно представить в виде суммы потенциала (2) и квадратичной части по упругим переменным

$$F = Fp + F_t^S + F_t^Q + F_t^\lambda \tag{3}$$

где

$$\begin{aligned} F_t^S = {} & -\frac{1}{2}s_{11}\left(t_1^2 + t_2^2 + 2t_6^2\right) - \frac{1}{2}s_{33}t_3^2 - \frac{1}{2}s_{44}\left(t_4^2 + t_5^2\right) \\ & - s_{12}\left(t_1 t_2 - t_6^2\right) - s_{13}\left(t_1 t_3 + t_2 t_3\right) - s_{14}\left(t_1 t_4 - t_2 t_4 + 2t_5 t_6\right) \end{aligned} \tag{4}$$

$$F_t^Q = -Q_{11}\left(t_1 p_1^2 + 2t_6 p_1 p_2 + t_2 p_2^2\right) - Q_{33} t_3 p_3^2 - Q_{44}\left(t_5 p_1 p_3 + t_4 p_2 p_3\right)$$
$$-Q_{21}\left(t_2 p_1^2 - 2t_6 p_1 p_2 + t_1 p_2^2\right) - Q_{31}\left(t_1 + t_2\right) p_3^2 - Q_{13}\left(p_1^2 + p_2^2\right) t_3 \quad (5)$$
$$-Q_{14}\left(2t_5 p_1 p_2 + \left(p_1^2 - p_2^2\right) t_4\right) - Q_{41}\left(2t_6 p_3 p_1 + t_1 p_3 p_2 - t_2 p_3 p_2\right)$$

$$F_t^\lambda = -\lambda_1\left(t_1 + t_2\right) - \lambda_3 t_3 \quad (6)$$

Здесь s_{mn} – податливости, t_k – напряжения, в нотации Фойгта, Q_{ik} - электрострикционные константы. Коэффициенты λ_m определяют тепловое расширение, которые будем предполагать линейными в зависимости от температуры

$$\lambda_1 = \alpha_1(T - T_c),\ \lambda_3 = \alpha_3(T - T_c),\ T_c = 890^0\text{K}.$$

2 Температурное поведение материальных констант

Состояние пьезоэлектрической среды описывается системой уравнений

$$E_i = \frac{\partial F}{\partial p_i},\ u_i = -\frac{\partial F}{\partial t_i}, \quad (7)$$

которая зависит от параметров **p** (поляризация), **u** (деформация), **t** (напряжения) и **E** (электрическое поле). Эта система позволяет найти спонтанную поляризацию и деформации основного состояния. Первая вариация уравнений системы (7) вблизи основного состояния позволяет определить коэффициенты уравнений пьезоэффекта: ε_{ik}^T – константы диэлектрической проницаемости при постоянной температуре, d_{ik} – пьезоэлектрические константы, s_{ik}^E – податливость при постоянном электрическом поле, ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума. Для нахождения полного комплекта констант Q_{km} термодинамического потенциала (4-6) необходимо использовать экспериментальные

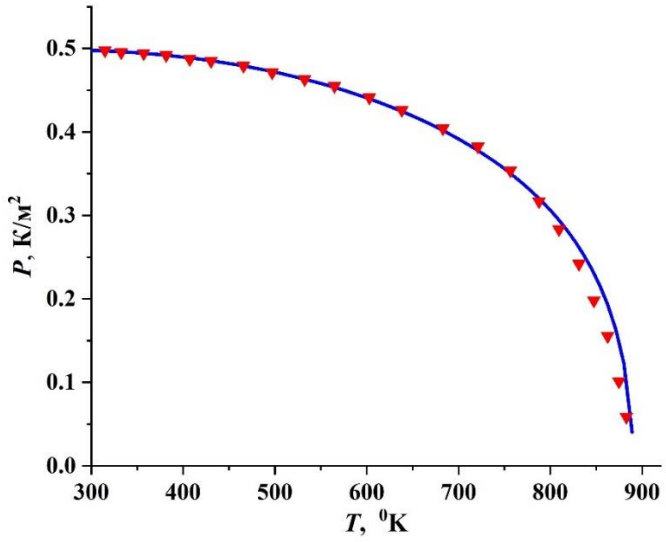


Рис.1. Зависимость спонтанной поляризации танталата лития от температуры. Линия – результаты расчета, символы – экспериментальные данные [4].

значения материальных постоянных в сочетании с коэффициентами электрооптического и акустооптического эффектов. На рис. 1 представлены графики поведения поляризации P_3 в зависимости от температуры. Сплошная линия – результаты расчета с использованием предложенной формы термодинамического потенциала, символы – результаты экспериментальных исследований [4]. Как следует из графиков, имеет место хорошее согласование результатов расчетов с экспериментальными данными. При комнатной температуре (T=300°K) спонтанная поляризация равна 0.5 К/м^2.

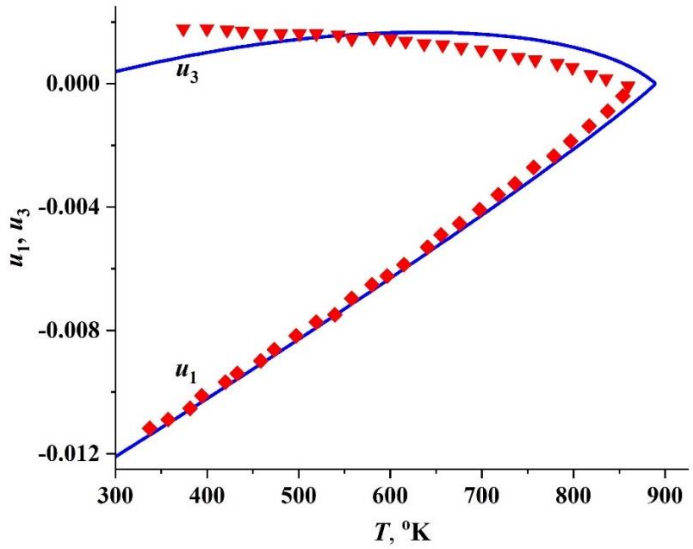


Рис.2. Зависимость спонтанной деформации танталата лития от температуры. Линии – результаты расчета, символы – экспериментальные данные [5].

На рис. 2 представлено поведение спонтанной деформации в зависимости от температуры, вычисленное с помощью предложенного термодинамического потенциала (сплошные линии) и экспериментальные результаты, полученные на основе рентгеноструктурного анализа [5] (символы). Как следует из рисунка, имеет место удовлетворительное совпадение результатов расчетов с использованием термодинамического потенциала (3) с экспериментальными данными. Использование представленного в литературе комплекта экспериментальных значений материальных постоянных линейных уравнений пьезоэффекта, а также электрооптических и акустооптических постоянных, позволяет определить все коэффициенты рассматриваемого потенциала Ландау. С его помощью построены зависимости всех материальных постоянных от температуры. Как следует из полученных результатов, часть материальных постоянных, прежде всего упругих, демонстрируют термостабильность вплоть до 600K.

Заключение

Построен потенциал Ландау шестой степени для танталата лития, у которого коэффициент при квадрате поляризации вдоль тригональной оси нелинейно зависит от

температуры. Такой потенциал, по сравнению с традиционно используемым потенциалом 4-ой степени, позволяет с большей степенью адекватности описать зависимость спонтанной поляризации и компонент вектора деформации от температуры, что подтверждается хорошим согласованием результатов вычислений с экспериментальными результатами. Использование представленного в литературе комплекта экспериментальных значений материальных постоянных линейных уравнений пьезоэффекта, а также электрооптических и акустооптических постоянных, позволяет определить все коэффициенты рассматриваемого потенциала Ландау. С его помощью построены зависимости всех материальных постоянных от температуры. Как следует из полученных результатов, часть материальных постоянных, прежде всего упругих, проявляют термостабильность вплоть до 600K. Часть пьезоэлектрических, электрооптических и акустооптических коэффициентов в этом диапазоне также являются термостабильными. В то же время значительная часть указанных констант в диапазоне T>600K демонстрируют существенную зависимость от температуры. Представленные результаты могут представлять интерес при проектировании микро- и наноэлектронной, электрооптической и акустооптической аппаратуры.

Работа выполнена в рамках реализации государственного задания Южного научного центра Российской академии наук (номер госрегистрации 125011200151-9).

Список литературы

1. *Smith R.T., Welsh F.S.* Temperature Dependence of the Elastic, Piezoelectric, and Dielectric Constants of Lithium Tantalate and Lithium Niobate // J. Appl. Phys. 1971. **42.** N 6. P. 2219–2230.
2. *Murakami S., Watanabe K., Takigawa R.* Investigation of the interface between LiNbO3 and Si fabricated via room-temperature bonding method using activated Si nano layer // Jpn. J. Appl. Phys. 2023. **62**. doi: 10.35848/1347-4065/acc2cb
3. *Glass A.M.* Dielectric, Thermal, and Pyroelectric Properties of Ferroelectric LiTaO3 // Physical Review 1968. **172**, P. 564-571.
4. *Scrymgeour D. A., Gopalan V., Itagi A., Saxena A., Swart P. J.* Phenomenological theory of a single domain wall in uniaxial trigonal ferroelectrics: Lithium niobate and lithium tantalate // Phys. Rev. B. 2005. **71.** 184110.
5. *Zhang Z.-G., Abe T., Moriyoshi C., Tanaka H., Kuroiwa Y.* Synchrotron-radiation X-ray diffraction evidence of the emergence of ferroelectricity in LiTaO3 by ordering of a disordered Li ion in the polar direction // Applied Physics Express. 2018. **11.** 071501.

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39510

Гибридизация прямых и обратных акустических волн в слоистых структурах на основе XY-пластины парателлурита и пьезоэлектрических пленок ниобата лития и цирконата-титаната свинца

Дацук Е.Р., Смирнов А.В., Кузнецова И.Е.

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва;

Тел.: (+7-981-504-70-11); Факс: (-) (автора-корреспондента)

E-mail: (datsuk.elizaveta@yandex.ru)

В результате теоретического исследования обратных акустических волн в анизотропных пластинах и слоистых структурах на их основе был обнаружен необычный эффект. В XY-пластине парателлурита (X-срез, Y-направление распространения) наблюдаются пересечения дисперсионных зависимостей прямых и обратных акустических волн высших порядков. При этом добавление пьезоэлектрического слоя приводит к гибридизации (связыванию) волн, происходит расталкивание дисперсионных кривых в месте пересечения. В данной работе более подробно была изучена гибридизация прямых и обратных волн в слоистых структурах на основе XY-пластины парателлурита и пьезоэлектрических пленок ниобата лития и цирконата-титаната свинца. Показано, что расталкивание дисперсионных кривых увеличивается с увеличением толщины пьезоэлектрического слоя. В случае использования пленки ниобата лития, эффект наблюдается более сильно, чем при использовании пленки цирконата-тиатаната свинца. Выполнен количественный расчет изменения механической и электрической энергии и коэффициентов электромеханической связи исследуемых волн при гибридизации. Полученные результаты могут быть полезны для разработки метода возбуждения непьезоактивных обратных акустических волн посредством передачи энергии от более пьезоактивной гибридной волны.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 23-79-10079.

Ключевые слова: обратные акустические волны, акустические волны в слоистых структурах, гибридизация акустических волн

Hybridization of forward and backward acoustic waves in layered structures based on an XY-cut paratellurite plate and piezoelectric films of lithium niobate and lead zirconate titanate

Datsuk E.R., Smirnov A.V., Kuznetsova I.E.

Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics, RAS, Moscow;

Tel.: (+7-981-504-70-11); Fax: (−) (corresponding author) E-mail: datsuk.elizaveta@yandex.ru

A theoretical investigation of backward acoustic waves in anisotropic plates and layered structures based on them revealed an unusual effect. In an XY-cut paratellurite plate (X-cut, Y-propagation direction), crossings of the dispersion curves of forward and backward higher-order acoustic waves are observed. The addition of a piezoelectric layer leads to hybridization (coupling) of the waves, resulting in repulsion of the dispersion curves at the crossing point. In this work, the hybridization of forward and backward waves in layered structures based on an XY-cut paratellurite plate and piezoelectric films of lithium niobate and lead zirconate titanate was studied in greater detail. It is shown that the repulsion of the dispersion curves increases with increasing thickness of the piezoelectric layer. In the case of a lithium niobate film, the effect is more pronounced than with a lead zirconate titanate film. A quantitative calculation of the changes in mechanical and electrical energy and the electromechanical coupling coefficients of the investigated waves upon hybridization was performed. The results obtained may be useful for developing a method of exciting non-piezoactive backward acoustic waves through energy transfer from a more piezoactive hybrid wave.

The work was supported by the Russian Science Foundation, project No. 23-79-10079.

Keywords: backward acoustic waves, acoustic waves in layered structures, hybridization of acoustic waves

УДК: 62-982:66-982:538.951:534-18. DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39511

Технология создания слоистой структуры TeO_2 – ZnO для использования в акустоэлектронике

В.И. Анисимкин[1], Ю.В. Писаревский[2], Е.В. Голованов[1], Е.Р. Дацук[1], В.В. Кашин[1], В.В. Колесов[1], И.Е. Кузнецова[1], А.В. Смирнов[1], А.С. Фионов[1,a]

[1] *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова Российской академии наук, 125009, Москва, Россия, Моховая ул., д. 11, стр. 7.*

[2] *Отделение "Институт кристаллографии им. А.В.Шубникова" Курчатовского комплекса кристаллографии и фотоники НИЦ "Курчатовский институт", 119333 Москва, Ленинский проспект 59, стр. 1.*

E-mail: [a]*fionov@cplire.ru*

Разработана технология создания слоистой структуры TeO_2-ZnO методом магнетронного напыления в вакууме. Исследованы различные технологические режимы напыления. На полученные структуры методом безмасочной литографии с последующим магнетронным напылением в вакууме нанесены встречно-штыревые преобразователи для возбуждения пьезоактивных акустических волн. Параметры встречно-штыревых преобразователей и возбуждаемых пьезоактивных акустических волн были предварительно получены при помощи метода матрицы передачи. Измерены АЧХ экспериментальных образцов акустических устройств на основе структуры TeO_2 – ZnO. Выполнено аналитическое сравнение измеренных АЧХ акустических устройств на основе структуры TeO_2 – ZnO и на основе пластины $LiNbO_3$.

Ключевые слова: слоистые структуры TeO_2-ZnO, магнетронное напыление в вакууме, пьезоактивные акустические волны.

TeO_2 – ZnO layered structure creation technology for use in acoustoelectronics

V.I. Anisimkin[1], Y.V. Pisarevsky[2], E.V. Golovanov[1], E.R. Datsuk[1], V.V. Kashin[1], V.V. Kolesov[1], I.E. Kuznetsova[1], A.S. Smirnov[1], A.S. Fionov[1,a]

[1] Federal State Budgetary Institution of Science V.A.Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences, 11-7 Mokhovaya St., Moscow, 125009, Russia.

2 Department of the A.V.Shubnikov Institute of Crystallography, Kurchatov Institute of Crystallography and Photonics, Kurchatov Institute, 119333 Moscow, Leninsky Prospekt 59-1.

E-mail: [a]fionov@cplire.ru

A technology for creating a layered structure of TeO_2-ZnO by magnetron sputtering in vacuum has been developed. Various technological modes of spraying have been investigated. Counter-pin transducers for excitation of piezoactive acoustic waves are applied to the obtained structures by maskless lithography followed by magnetron sputtering in vacuum. The parameters of the counter-pin transducers and the excited piezoactive acoustic waves were previously obtained using the transmission matrix method. The frequency response of experimental samples of acoustic devices based on the TeO_2 – ZnO structure was measured. An analytical comparison of the measured frequency response of acoustic devices based on the TeO_2 – ZnO structure and based on the $LiNbO_3$ plate has been performed.

Keywords: layered structures of TeO_2-ZnO, magnetron sputtering in vacuum, piezoactive acoustic waves.

PACS: 43.00.00; 62.00.00; 68.00.00.

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39512

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ЖИДКОСТЕЙ И ПРОЦЕССА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ФУЛЛЕРИТА С ПОМОЩЬЮ СВЧ АКУСТОЭЛЕКТРОННОГО СЕНСОРА НА АЛМАЗНОЙ ПОДЛОЖКЕ

Яшин Д.В., Сорокин Б.П.

Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет), г. Долгопрудный

Тел.: +7(986)926-55-90; E-mail: iashin.dv@phystech.edu

Высокая чувствительность, быстрый отклик на воздействие и малые размеры акустоэлектронных сенсоров делают привлекательным их использование для диагностики жидкостей во многих областях. В настоящей работе исследовались свойства жидкостей при помощи СВЧ акустоэлектронных сенсоров на основе композитных резонаторов со структурой «Al/ASN/Mo/(100) алмаз» (ASN – пьезоэлектрик нитрид алюминия-скандия). В качестве операционных мод использовали продольные и сдвиговые объемные акустические волны (ОАВ) в диапазоне 0,8 – 6,0 ГГц. Были исследованы вода, ацетон, толуол, а также водные растворы NaCl, изопропанола и глицерина с различными концентрациями. Продемонстрирована линейная зависимость амплитуды сигнала сенсора от коэффициента отражения акустической волны на границе «(100) алмаз/жидкость». Получены величины акустических импедансов исследованных веществ. Проведена оценка частотной зависимости акустического затухания в глицерине. Изучен процесс осаждения фуллерита C_{60} из раствора толуола на поверхность сенсора. Продемонстрировано уменьшение амплитуды сигнала и добротности сенсора по мере нарастания кристаллитов C_{60}. Показано, что такие изменения аналогичны как для продольных, так и сдвиговых операционных мод. Алмаз как материал сенсора жидкостей обладает высокой химической инертностью и стойкостью к абразивным воздействиям, что важно при многократном использовании.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (соглашение № 25-43-00107 от 26 декабря 2024 г.).

Ключевые слова: свойства жидкостей, кристаллизация фуллерита, акустоэлектронный сенсор, алмаз, СВЧ

INVESTIGATION OF THE PROPERTIES OF LIQUIDS AND THE CRYSTALLIZATION PROCESS OF FULLERITE USING A MICROWAVE ACOUSTOELECTRONIC SENSOR ON A DIAMOND SUBSTRATE

Yashin D.V., Sorokin B.P.
Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny, Russian Federation
Phone: +7(986) 926-55-90; E-mail: iashin.dv@phystech.edu

The high sensitivity, fast response on impact, and small size of acoustoelectronic sensors make their use attractive for fluid diagnostics. In this work, the properties of liquids were studied using microwave acoustoelectronic sensors based on high-overtone bulk acoustic resonators with the "Al/ASN/Mo/(100)diamond" structure (ASN is a piezoelectric aluminum-scandium nitride). Longitudinal (L) and shear (S) bulk acoustic waves (BAW) in the range of 0.8 – 6.0 GHz were used as operating modes. Water, acetone, toluene, as well as aqueous solutions of NaCl, 2-propanol, and glycerin with various concentrations were studied. The linear dependence of the amplitude of the sensor signal on the reflection coefficient of an acoustic wave at the "(100) diamond/liquid" boundary is demonstrated. The values of acoustic impedances of the studied substances ware obtained. The frequency dependence of acoustic attenuation in glycerin was estimated. The deposition of C_{60} fullerite from a toluene solution onto the sensor surface has been studied. A decrease in the signal amplitude and the *Q*-factor of the sensor was demonstrated as the C_{60} crystallites increase. It was shown that such changes are similar for both L- and S-modes. Diamond has high chemical inertia and resistance to abrasives which is important for repeated use.

The research was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation within the framework of the scientific project No. 25-43-00107 from December 26, 2024.

Key words: properties of liquids, crystallization of fullerite, acoustoelectronic sensor, diamond, UHF

УДК: 534-14 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39513

Влияние температуры на акустические характеристики кислотных и щелочных электролитов

Шамсутдинова Е.С.[1,a], Анисимкин В.И.[1], Кузнецова И.Е.[1], Колесов В.В.[1],

[1] ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Москва.

Тел.: (965 8873710) (автора-корреспондента)

E-mail: [a]shes1996@bk.ru

Аннотация: В работе представлены результаты экспериментальных исследований электролитов с применением объемных акустических волн (ОАВ). Получены количественные величины коэффициентов пропускания и отражения ОАВ для кислотных и щелочных электролитов. Измерения выполнены в широком температурном диапазоне от -50 до +50°C, что напрямую влияло на вязкость и упругие модули электролитов. Предложена модель для прогнозирования свойств, учитывающая вязкость и плотность. Результаты открывают перспективы применения ОАВ в акустической сенсорике для контроля работоспособности аккумуляторов.

Ключевые слова: объемные акустические волны, акустические характеристики жидкости, аккумуляторные батареи

Effect of Temperature on the Acoustic Characteristics of Acidic and Alkaline Electrolytes

Shamsutdinova E.S.[1,a], Anisimkin V.I.[1], Kuznetsova I.E.[1], Kolesov V.V.[1]

[1]Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics, Russian Academy of Sciences, Moscow.

Tel.: (965 8873710) (corresponding author)

E-mail: [a]shes1996@bk.ru

Abstract: The paper presents the results of experimental studies of electrolytes using bulk acoustic waves (BAW). Quantitative values of BAW transmission and reflection coefficients were obtained for acidic and alkaline electrolytes. Measurements were performed over a wide temperature range from −50 to +50 °C, which directly affected the viscosity and elastic moduli of the electrolytes. A model for property prediction is proposed, accounting for viscosity and density. The results open up prospects for the application of BAW in acoustic sensing for battery health monitoring.

Keywords: bulk acoustic waves, acoustic characteristics of liquids, storage batteries

УДК: 534.231.3 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39514

Исследование влияния вязкости жидкости на характеристики щелевой акустической моды

А.П. Семёнов[1,a], Б.Д. Зайцев[1], А.А. Теплых[1], И.А. Бородина[1]

[1] *Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Саратовский филиал. 410019, г. Саратов, ул. Зеленая, д.38.*
E-mail: [a]alex-sheih@yandex.ru

Аннотация: Экспериментально исследовано влияние вязкости непроводящих жидкостей на характеристики щелевой акустической моды, возбуждаемой в структуре: «линия задержки – резонирующая пьезопластина – жидкость». Линия задержки была изготовлена из пластины ниобата лития Y-X – среза. На одной стороне пластины располагались два встречно-штыревых преобразователя (ВШП) которые возбуждали и принимали акустическую волну с поперечно-горизонтальной поляризацией нулевого порядка (SH0) в частотном диапазоне 1.5 – 2.2 МГц. ВШП подключались к анализатору цепей в режиме измерения частотной зависимости коэффициента прохождения S12. К поверхности линии задержки, между ВШП, прикладывалась резонирующая пластина ниобата лития Y-X+155° кристаллографического среза толщиной около 500 мкм с жидкостным контейнером объемом 2 мл. При расположении над линией задержки резонирующей пьезоэлектрической пластины на частотной зависимости полных потерь появлялась последовательность резонансных пиков. Были исследованы образцы смеси воды с глицерином с различным относительным объемным содержанием глицерина и технические жидкости с различной вязкостью. Получены зависимости глубины и частоты каждого резонансного пика от объемного содержания глицерина в воде и от вязкости исследуемых жидкостей.

Ключевые слова: линия задержки, щелевая акустическая мода, акустическая волна с поперечно-горизонтальной поляризацией, жидкостные датчики, вязкость жидкостей

The study of the influence of liquid viscosity on the characteristics of the slot acoustic mode

A.P. Semyonov[1,a], B.D. Zaitsev[1], A.A. Teplykh[1], I.A. Borodina[1]

[1] *Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics, Russian Academy of Sciences, Saratov Branch. Saratov 410019, Russia.*
E-mail: [a]alex-sheih@yandex.ru

Abstract: The effect of the viscosity of non-conducting liquids on the characteristics of a slot acoustic mode excited in a structure: «delay line – resonating piezoelectric plate – liquid» was

experimentally studied. The delay line was made of a Y-X-cut lithium niobate plate. Two interdigital transducers (IDTs) were located on one side of the plate, which excited and received an acoustic wave with zero-order shear-horizontal polarization (SH0) in the frequency range of 1.5–2.2 MHz. The IDTs were connected to a network analyzer in the mode of measuring the frequency dependence of the transmission coefficient S12. A resonating lithium niobate plate, of Y-X+155° crystallographic cut, with the thickness approximately 500 μm, containing a 2 ml liquid container, was located on the surface of the delay line between the IDTs. When the resonating piezoelectric plate was located above the delay line, a sequence of resonant peaks appeared on the frequency dependence of the insertion loss. Samples of a water-glycerin mixture with varying relative volumetric glycerin contents and technical liquids with varying viscosity were studied. The dependences of the depth and frequency of each resonance peak on the volumetric content of glycerol in water and on the viscosity of the studied liquids were obtained.

Keywords: delay line, slot acoustic mode, shear-horizontal polarized acoustic wave, liquid sensors, viscosity of liquids

PACS: 43.20+g

Введение

В последние десятилетия не снижается интерес к щелевым акустическим волнам, распространяющимся в структуре, состоящей из двух пьезоэлектрических пластин, разделенных воздушным зазором [1]. Исследованы характеристики щелевых волн в зависимости от зазора между пластинами и от коэффициента электромеханической связи взаимодействующих волн. Как было показано ранее, расположение над линией задержки с двумя встречно-штыревыми преобразователями (ВШП) резонирующей пьезоэлектрической пластины приводит к возбуждению щелевой моды и появлению последовательности резонансных пиков на частотной зависимости полных потерь [2]. Известно, что частота и глубина этих пиков зависит как от зазора между пластинами и свойств обеих пластин, так и от вязкости, проводимости и диэлектрической проницаемости жидкости, контактирующей с верхней гранью пластины-резонатора [2, 3]. Тем не менее, в известных работах, посвященных разработке и созданию жидкостных [3] и биологических датчиков, для анализа свойств исследуемых жидкостей предлагается использовать только один резонансный пик. Возможно, что для более глубокого и точного изучения свойств жидкости следует вовлекать в процесс измерения все резонансные пики и исследовать в качестве верхней резонирующей пластины другие материалы и кристаллографические ориентации. Целью данной работы является экспериментальное исследование влияния непроводящих жидкостей с различной вязкостью и диэлектрической проницаемостью на глубину и частоту девяти резонансных

пиков, наблюдаемых в структуре «линия задержки – резонирующая платина ниобата лития Y-X+155° среза – жидкость».

1 Установка для исследования влияния вязкости жидкости на характеристики щелевой акустической моды

В качестве линии задержки была использована пластина ниобата лития Y-X – среза толщиной 350 мкм с двумя встречно-штыревыми преобразователями на одной стороне пластины. ВШП с расщепленными электродами располагались на расстоянии 40 мм друг от друга. ВШП возбуждали и принимали акустическую моду с поперечно-горизонтальной поляризацией нулевого порядка (SH_0) в частотном диапазоне 1.5 – 2.2 МГц. К верхней грани пластины-резонатора из ниобата лития X-Y+155°–среза, расположенного над линией задержки между ВШП, был прикреплен жидкостной контейнером объемом 2 мл (рис. 1).

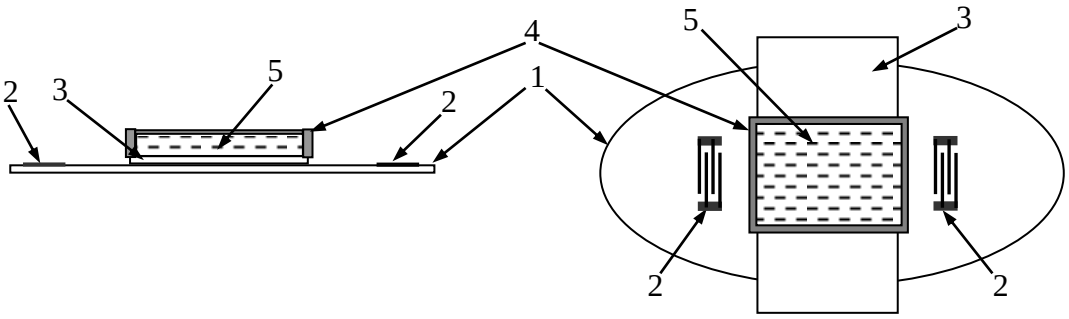


Рис. 1. Установка для проведения исследований с жидкостями: 1 – пластина Y-X – среза ниобата лития, 2 – ВШП, 3 – резонирующая пьезоэлектрическая пластина Y-X+155° – среза ниобата лития, 4 – контейнер для жидкости, 5 – исследуемая жидкость.

2 Методика проведения эксперимента

Для проведения измерений был использован анализатор цепей E5071C («Agilent», USA), к которому подключались ВШП линии задержки в режиме измерения частотной зависимости коэффициента прохождения S_{12}. Частотная зависимость полных потерь, как свободной линии задержки, так и в присутствии резонирующей пластины ниобата лития Y-X+155° среза с жидкостным контейнером представлены на рисунке 2.

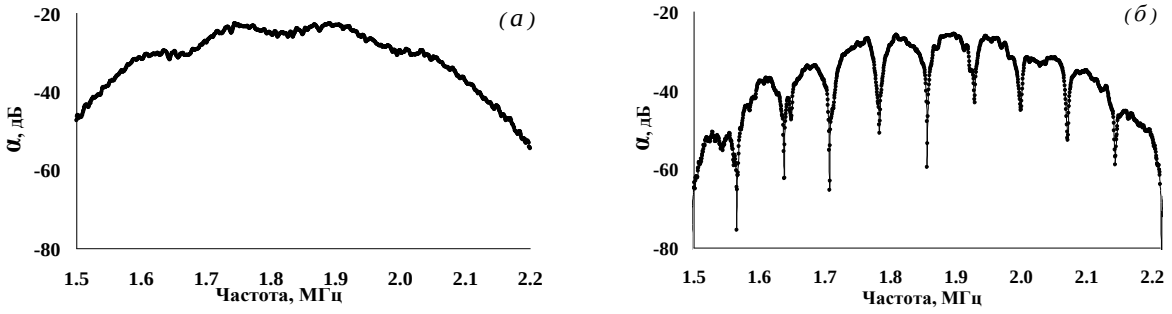


Рис. 2. Частотные зависимости полных потерь α для линии задержки без резонатора (а) и линии задержки в присутствии резонирующей пластины Y-X+155° – среза ниобата лития с пустым жидкостным контейнером (б).

На следующем этапе работы жидкостный контейнер заполнялся исследуемой жидкостью, после чего измерялись частотные зависимости полных потерь. Было использовано 6 образцов смесей воды с глицерином с различным относительным объемным содержанием глицерина β: 0%, 44%, 65%, 75%, 90% и 100%. Для определения плотности образцов ρ фиксированный объем (1 мл) каждого образца жидкости взвешивался на аналитических весах (Pioneer PA-214C, OHAUS Corporation, NJ, USA). Сдвиговая вязкость η_{44} всех образцов жидкости измерялась с помощью вискозиметра SV-10 (A&D, Japan). Диэлектрическая проницаемость ε определялась при помощи плоского конденсатора и измерителя импедансов E4990A (Keysight Technologies, Santa Rosa, CA, USA). Значения плотности ρ, поперечной вязкости η_{44} и относительной диэлектрической проницаемости ε исследуемых образцов жидкостей, определенные экспериментально при температуре около 26° С, приведены в таблице 1. В данной работе проводимость всех образцов определялась при помощи кондуктометра (HI8733, HANNA Instruments, Woonsocket, RI, USA) и не превышала 2 мкСм/см.

Таблица 1

Материальные константы используемых образцов смесей воды с глицерином

β, %	ρ, кг/м³	ε	η_{44}, мПа·с
0	1000	81	0.81
44	1108	69	4.2
65	1170	62	16.7
75	1192	57	32.4
90	1232	44	292
100	1257	36	547

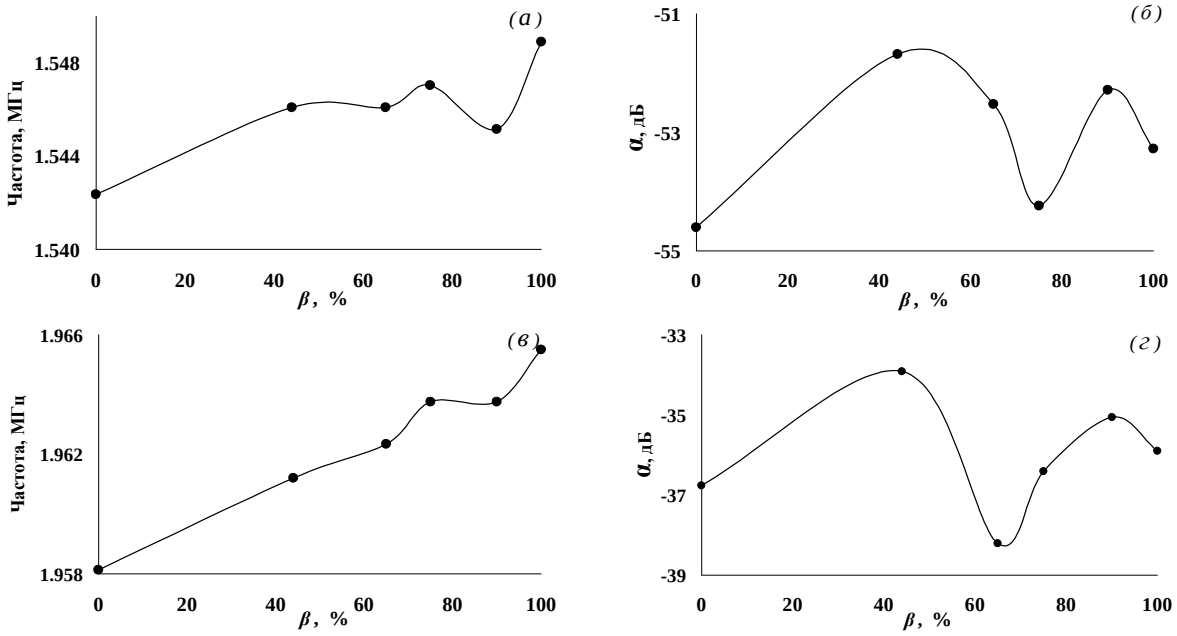


Рис. 3. Зависимости частоты ((а), (в)) и полных потерь α ((б), (г)) от объемной концентрации глицерина в воде для линии задержки в присутствии резонирующей пластины Y-X+155° – среза ниобата лития с жидкостным контейнером, заполненным исследуемой жидкостью: (а) и (б) – второй пик, (в) и (г) – восьмой пик.

Рис. 3, *а* показывает, что с ростом концентрации глицерина в воде от 0% до 44% частота второго резонанса увеличивается, в интервале от 44% до 75% практически не изменяется, затем немного понижается и далее опять увеличивается. Частота восьмого пика (рис. 3, *в*), как и других резонансных пиков, только увеличивается с ростом концентрации глицерина в воде. Известно, что рост концентрации глицерина в воде увеличивает вязкость и механический импеданс смеси и снижает ее диэлектрическую проницаемость. Увеличение вязкости и уменьшение диэлектрической проницаемости жидкости увеличивают частоту резонансных пиков, а рост механического импеданса приводит к ее снижению [3]. Комбинация этих трех факторов может обуславливает сложную зависимость резонансной частоты второго пика от концентрации глицерина. При этом, зависимости полных потерь от концентрации глицерина имеют ярко выраженный минимум при β = 65 – 75%. Такое сложное поведение, по-видимому, также связано с вышеперечисленными факторами.

Для следующего этапа исследований были подобраны непроводящие жидкости с различными значениями поперечной вязкости η_{44} и приблизительно одинаковыми значениями диэлектрической проницаемости ε и плотности ρ, которые определялись экспериментально при температуре около 26° С (таблица 2). Такая комбинация параметров

Таблица 2

Материальные константы используемых образцов технических жидкостей

жидкость	ρ, кг/м³	ε	η_{44}, мПа·с
керосин ТС-1	750	3.5	0.54
жидкий парафин	832	3.5	120
масло Castrol Magnatec 10W-40	851	2.8	187
жидкий парафин 50% + масло CPL-460 50%	849	3.4	330
жидкий парафин 20% + масло CPL-460 80%	858	3.3	560
масло CPL-460	864	3.2	840

позволяла исследовать влияние вязкости на резонансные пики с сохранением неизменных значений диэлектрической проницаемости и механического импеданса. В соответствии с вышеописанной методикой были получены зависимости частоты и полных потерь от вязкости жидкостей для исследуемой пьезоэлектрической структуры (рис. 4). Видно, что с ростом вязкости резонансная частота не меняется, а глубина пиков практически монотонно уменьшается. Сравнение рисунков 3 и 4 показывает, что изменение частоты связано с изменением диэлектрической проницаемости и механического импеданса жидкости, а увеличение вязкости жидкости приводит к уменьшению глубины пика практически во всех случаях за исключением второго пика. Глубина этого пика сначала практически не изменяется с ростом вязкости от 0.54 мПа·с до 187 мПа·с и в дальнейшем с ростом вязкости также уменьшается.

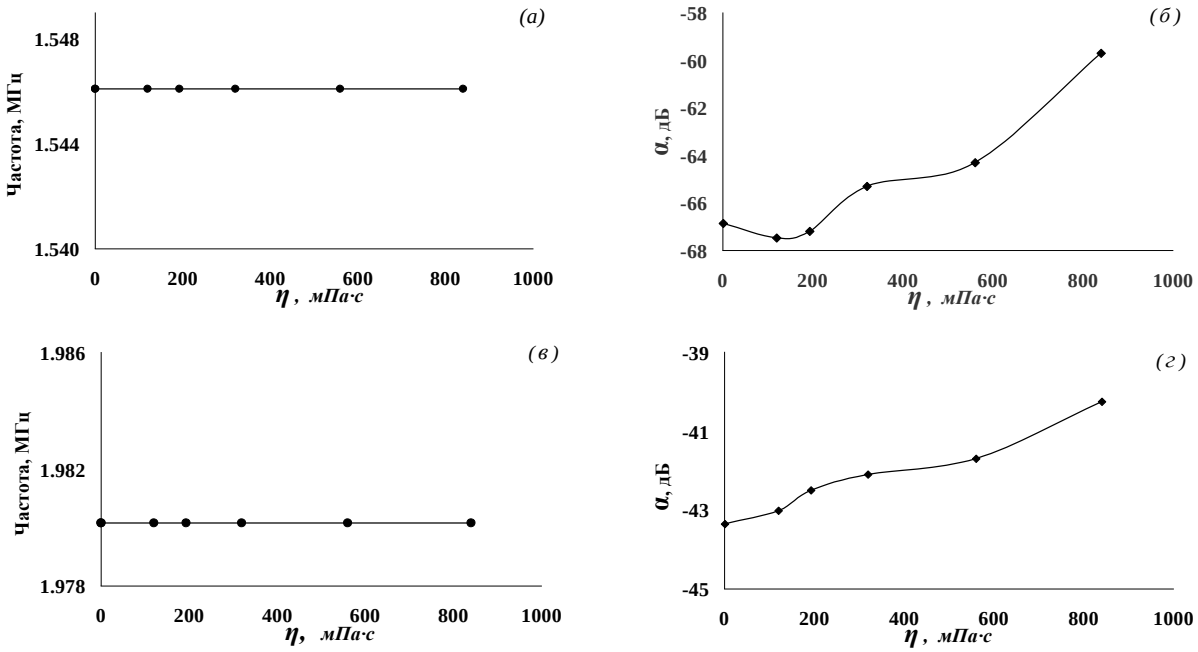


Рис. 4. Зависимости частоты ((а), (в)) и полных потерь α ((б), (г)) от вязкости жидкости для линии задержки в присутствии резонирующей пластины Y-X+155° – среза ниобата лития с жидкостным контейнером, заполненным исследуемой жидкостью: (а) и (б) – второй пик, (в) и (г) – восьмой пик.

Заключение

Экспериментально изучено влияние вязкости жидкости на характеристики щелевой акустической моды в частотном диапазоне 1.5 – 2.2 МГц. Было показано, что с увеличением вязкости жидкости при неизменных значениях диэлектрической проницаемости и механического импеданса резонансная частота практически не меняется, а глубина пиков монотонно уменьшается. Если же рост вязкости сопровождается увеличением механического импеданса и уменьшением диэлектрической проницаемости (смеси вода – глицерин с различной концентрацией глицерина), то зависимости глубины резонансных пиков имеют сложный характер с ярко выраженным минимумом, а резонансные частоты пиков увеличиваются в большинстве случаев. Результаты исследований могут быть использованы при создании акустоэлектронных жидкостных сенсоров, работающих на щелевой моде.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН (FFWZ -2025-0001).

Список литературы

1. *Гуляев Ю.В., Плесский В.П.* // Акуст. журн. 1977. **23**, №3. С. 716.
2. *Borodina I.A., Zaitsev B.D., Kuznetsova I.E., Teplykh A.A.* // *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr.* 2013. **60**, №12. P. 2677.
3. *Borodina I.A., Zaitsev B.D., Teplykh A.A.* // Ultrasonics. 2018. **82**. P. 39.

УДК: 579.6 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39515

Акустическая сенсорная система для индикации онкологических клеток с локализованными на них белками теплового шока в проводящих суспензиях

И.А. Бородина[1,a], Б.Д. Зайцев[1], А.А. Теплых[1], С.А. Староверов[2,3], О.И. Гулий[2]

[1] *Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук, Саратовский филиал. 410019, г. Саратов, ул. Зеленая, д.38.*

[2] *Институт биохимии и физиологии растений и микроорганизмов - обособленное структурное подразделение Федерального исследовательского центра «Саратовский научный центр Российской академии наук» (ИБФРМ РАН). 410049, г. Саратов, просп. Энтузиастов, д. 13.*

[3] *Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова. 410012, г. Саратов, просп. им. Петра Столыпина, д. 4, стр. 3.*

E-mail: [a]*borodinaia@yandex.ru*

Аннотация: Одним из перспективных направлений в диагностике онкологических заболеваний является развитие акустических сенсорных систем для индикации раковых клеток, на поверхности которых экспрессируются белки теплового шока (БТШ). Обнаружение клеток с локализованными на их поверхности БТШ, является важным диагностическим признаком, поскольку повышенный уровень содержания БТШ является своеобразным биомаркером при ранней диагностике опухолей. В работе экспериментально показана возможность индикации клеток, на поверхности которых локализованы БТШ, с помощью компактной акустической сенсорной системы на основе пьезоэлектрического резонатора с поперечным электрическим полем и специфичных к БТШ антител. Измерения проводили в суспензиях с различной проводимостью (140 – 2000 мкСм/см), а также в присутствии посторонних (мешающих) клеток. Полученные результаты могут быть использованы для развития и адаптации акустических сенсорных систем при ранней диагностике онкологических заболеваний.

Ключевые слова: Акустическая сенсорная система, клеточные линии, белки теплового шока, антитела

An acoustic sensor system for the detection of cancer cells with localized heat shock proteins in conductive suspensions

I.A. Borodina[1,a], B.D. Zaitsev[1], A.A. Teplykh[1], S.A. Staroverov[2,3] , O.I. Guliy[2]

[1] *Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics, Russian Academy of Sciences, Saratov Branch. Saratov 410019, Russia.*

[2] *Institute of Biochemistry and Physiology of Plants and Microorganisms – Subdivision of the Federal State Budgetary Research Institution Saratov Federal Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences (IBPPM RAS). Saratov 410049, Russia.*

[3]*Vavilov Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering. Saratov 410012, Russia.*

E-mail: [a]*borodinaia@yandex.ru*

Abstract: One promising area of cancer diagnostics is the development of acoustic sensor systems for detecting cancer cells expressing heat shock proteins (HSPs) on their surface. Detecting cells with HSPs localized on their surface is an important diagnostic indicator, as elevated HSP levels serve as a biomarker for early tumor diagnosis. This study experimentally demonstrates the feasibility of detecting cells expressing HSPs on their surface using a compact acoustic sensor system based on a piezoelectric resonator with a lateral electric field and HSP-specific antibodies. Measurements were performed in suspensions with varying conductivities (140–2000 μS/cm), as well as in the presence of foreign (interfering) cells. The results obtained can be used to develop and adapt acoustic sensor systems for the early diagnosis of cancer.

Keywords: coustic sensory system, cell lines, heat shock proteins, antibodies

PACS: 43.20+g

Введение

Аномальная экспрессия и/или субклеточная локализация белков теплового шока (БТШ) наблюдается при развитии различных видов онкологических заболеваний. Такая сверхэкспрессия связана с неблагоприятным прогнозом развития заболевания и ответом на противоопухолевую терапию [1]. БТШ являются внутриклеточными и органеллоспецифичными молекулами, которые также встречаются в цитозоле, плазматической мембране, внеклеточных везикулах, биологических жидкостях и кровотоке [2]. Индикация клеток с локализованными на их поверхности БТШ, является важным диагностическим признаком, поскольку повышенный уровень содержания БТШ являются

своеобразным биомаркером при ранней диагностике опухолей и оценке благоприятности прогноза при мониторинге лечения у пациентов с распространенными видами рака [3].

Особую ценность при развитии методов определения биомаркеров представляют акустические сенсорные системы, поскольку позволяют проводить исследования без использования специальных меток при получении результата исследований в короткие временные промежутки. Акустические датчики продемонстрировали высокую специфичность, чувствительность и надежность при определении онкологических клеток [4,5]. Активное применение акустических сенсорных систем для индикации онкологических клеток обусловлено колоссальным прогрессом в конструкциях сенсорных систем и используемых материалах, благодаря чему появились новые возможности для работы с онкологическими клетками [6,7]. Кроме того, сочетание акустических датчиков с микрофлюидной техникой и оптической микроскопией расширило рынок возможных применений [8].

При развитии любого сенсорного подхода для онкодиагностики основополагающим моментом является адаптация метода проведения исследований в реальных образцах, особенно, в условиях повышенной проводимости среды измерения, а также в присутствии мешающих компонентов (посторонних клеток). Поэтому цель работы заключается в демонстрации возможности определения онкологических клеток, на поверхности которых экспрессируются БТШ, с помощью акустической сенсорной системы и антител, специфичных к БТШ, в условиях повышенной проводимости среды измерения и присутствии посторонних клеток.

1 Описание датчика и методика эксперимента

Акустическая сенсорная система, используемая в данной работе, состояла из резонатора с поперечным электрическим полем, совмещенным с компактным анализатором импеданса на базе электронного конструктора Arduino (Smart Projects, Италия), который представлял собой совокупность различных электронных модулей (микросхем) для создания готовых устройств [9]. Компактный анализатор импеданса состоял из высокочастотного (ВЧ) цифрового генератора сигналов AD9850, с частотным диапазоном 0 – 62.5 МГц и выходным напряжением от 0 до 0.2 В. Частота генератора и выходное напряжение задавались внешним контроллером ATmega 328, который связан с персональным компьютером. Электрическое напряжение на резонаторе с поперечным электрическим полем и ток, протекающий через него, измерялись стандартными выпрямителями, связанными с указанным контроллером. Специальная программа вычисляла модуль электрического импеданса Z и строила его зависимость от частоты. На рис. 1, *а* представлена компактная акустическая сенсорная

система и схема жидкостного датчика на основе резонатора с поперечным электрическим полем.

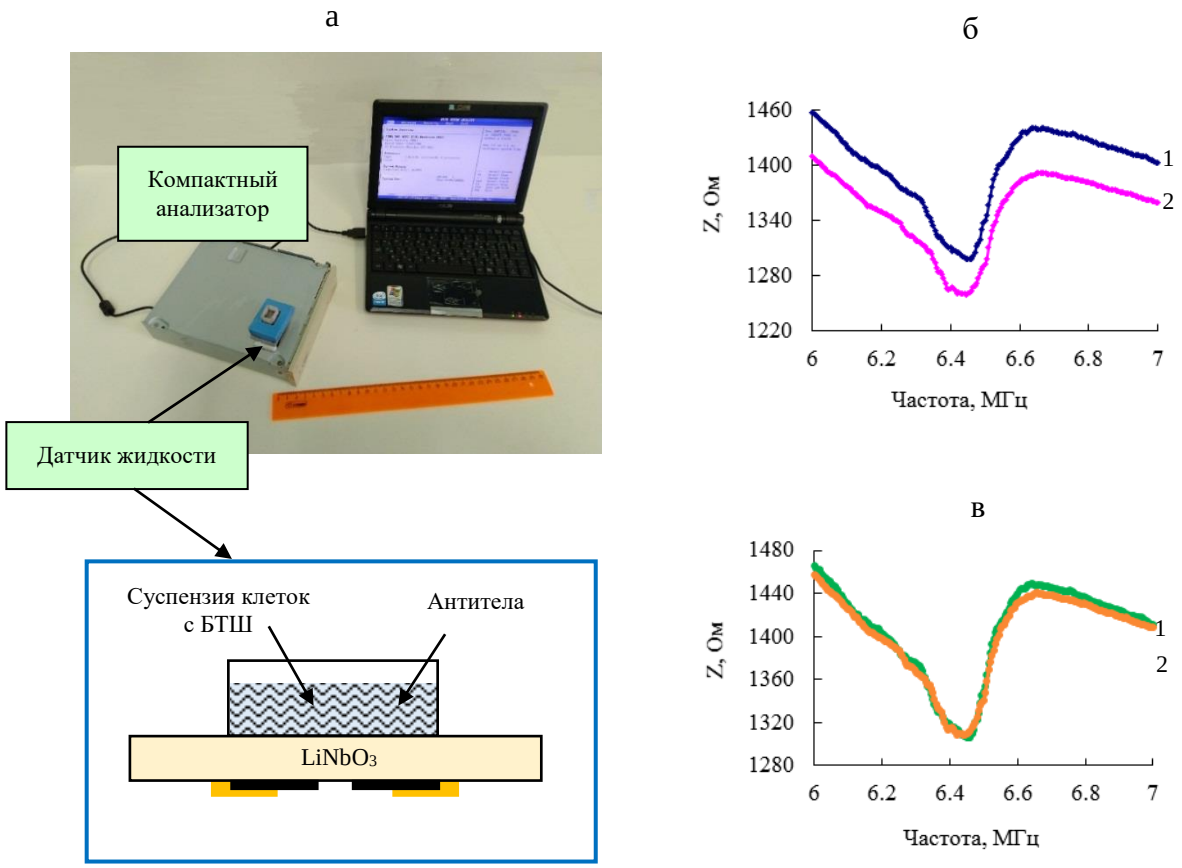


Рис. 1. (а) – Общая схема компактной акустической сенсорной системы и жидкостного датчика на основе резонатора с поперечным электрическим полем. (б) – Частотные зависимости модуля электрического импеданса датчика до (кривая 1) и после (кривая 2) добавления к суспензии с клеточными линиями специфичных антител. (в) - Частотные зависимости модуля электрического импеданса датчика для буферного раствора с проводимостью 140 мкСм/см до (кривая 1) и после (кривая 2) добавления клеточных линий (плотность 10^4 кл/мл).

В работе использовали клеточные линии из опухоли животных с подтвержденным онкологическим диагнозом, которые были получены из ветеринарной клиники Саратовского ГАУ им. Н.И. Вавилова.

Для проведения измерений суспензию клеток разводили в буферном растворе с различной проводимостью до конечной плотности суспензии (10^4 кл/мл) и проводили измерение частотных зависимостей модуля электрического импеданса датчика. Аналитическим сигналом служило изменение модуля электрического импеданса датчика (ΔZ) на фиксированной частоте после добавления к суспензии с клеточными линиями антител, специфичных к БТШ (рис. 1, *б*). Объем измерительной ячейки составлял ~2 мл. Регистрации аналитического сигнала осуществлялась в течение ~4 мин. Все эксперименты проводились не менее пяти раз.

2 Результаты и их обсуждение

Для получения поликлональных антител, специфичных к БТШ, проводили иммунизацию кроликов конъюгатами БТШ-антигена с наночастицами золота. Полученные

антитела проверяли на способность связываться с антигеном (БТШ) с помощью метода дот-иммуноанализа. Эти антитела использовали в качестве селективного компонента акустической сенсорной системы для определения онкологических клеток, на поверхности которых экспрессируется БТШ в проводящих буферных растворах с проводимостью 140; 400; 500; 1120; 2000 мкСм/см. Предварительно проводили эксперименты, подтверждающие отсутствие механической нагрузки на резонатор со стороны клеточных линий. В результате было показано, что внесение клеточных линий (плотность суспензии 10^4 кл/мл) в измерительную ячейку с буферным раствором (проводимость 140 мкСм/см) приводит к незначительному изменению модуля электрического импеданса датчика (ΔZ = 7 Ом на частоте 6.65 МГц). (рис. 1, *в*).

Исследование взаимодействия антител, специфичных к БТШ, с клетками, на поверхности которых локализованы БТШ, в растворах с различной проводимостью показали, что после добавления антител происходит значительное изменение модуля электрического импеданса резонатора для всех значений проводимости буферных растворов. На рис. 2, *а, б, в,* в качестве

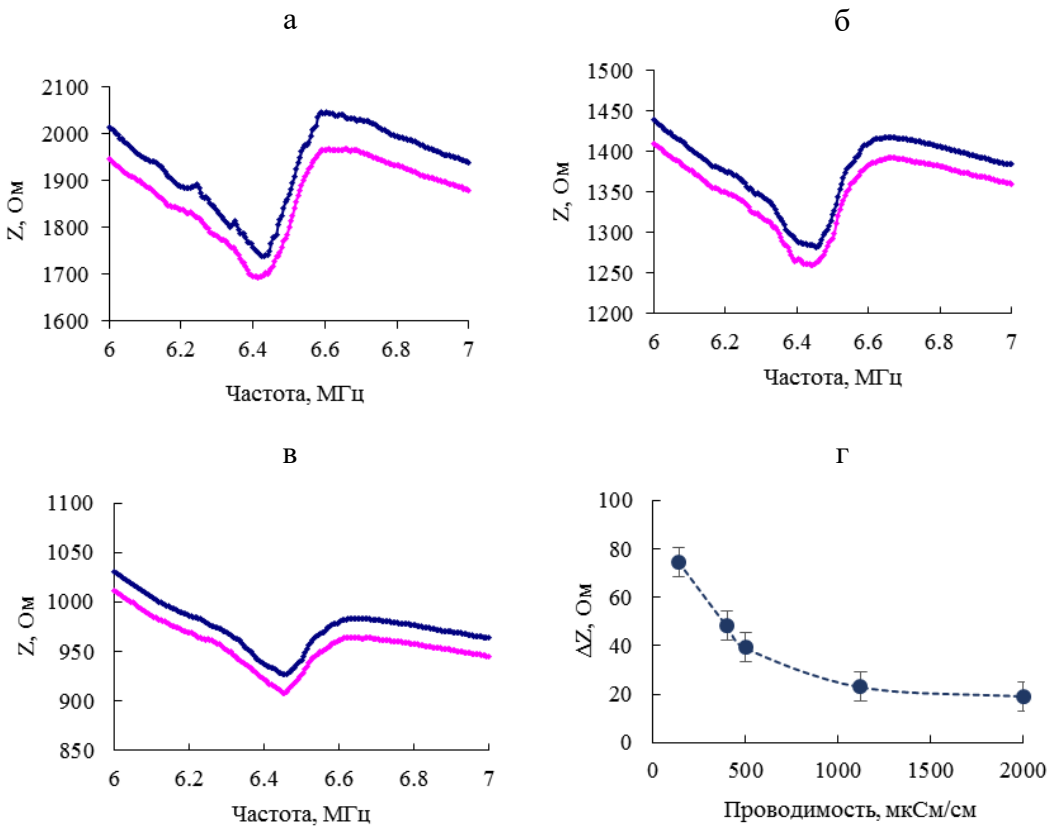


Рис. 2. Частотные зависимости модуля электрического импеданса компактного анализатора с клеточными линиями до (кривая 1) и после (кривая 2) добавления антител, специфичных к БТШ. Проводимость растворов: (а) –140; (б) – 500; (в) – 2000 мкСм/см. Зависимость изменения модуля электрического импеданса (ΔZ) от проводимости буферного раствора на частоте 6.65 МГц (г).

примера, представлены частотные зависимости модуля электрического импеданса датчика для проводимостей раствора 140, 500 и 2000 мкСм/см, соответственно. Было показано, что с увеличением проводимости буферного раствора величина аналитического сигнала (ΔZ) уменьшается (рис. 2, *г*).

Заключение

Показана возможность индикации БТШ, локализованных на онкологических клетках, в растворах с различной начальной проводимостью (140 – 2000 мкСм/см) с помощью акустической сенсорной системы путем регистрации специфичного взаимодействия БТШ с соответствующими антителами. Представленный метод может рассматриваться как дополнение к существующим и широко применяемым методам анализа БТШ.

Финансирование.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственных заданий ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН (FFWZ-2025-0001) и ИБФРМ РАН.

Список литературы

1. *Seigneuric R., Mjahed H., Gobbo J., Joly A.L., Berthenet K., Shirley S., Garrido C*. Heat Shock Proteins as Danger Signals for Cancer Detection. // Front Oncol. 2011. **1**:37.
2. *Albakova Z., Siam M.K.S., Sacitharan P.K., Ziganshin R.H., Ryazantsev D.Y., Sapozhnikov A.M.* Heat Shock Proteins in Lymphoma Immunotherapy. // Trans Oncol. 2021. **14**. 100995
3. *Kampinga H.H., Hageman J., Vos M.J., Kubota H., Tanguay R.M., Bruford E.A., et al.* Guidelines for the nomenclature of the human heat shock proteins. // Cell Stress Chaperon. 2009. **14**, N 1. P. 105–111.
4. *Ghayour R., Hojjat Y., Karafi M.R., Sadeghiyan H.* Development of a hybrid DEP-SAW device for trapping/sensing target cells. // Applied Acoustics. 2018. **141**. P. 355–361.
5. *Dahmardeh M., Sheybanifar S., Gharooni M., Janmaleki M., Abdolahad M.* Acoustic wave based biosensor to study electroacoustic based detection of progressive (SW-48) colon cancer cells from primary (HT-29) cells. // Sensors and Actuators A: Physical. 2015. **233**. P. 169–175.
6. *Aleixandre M., Horrillo M.C*. Recent Advances in SAW Sensors for Detection of Cancer Biomarkers // Biosensors. 2025. **15,** N 2. 88.
7. *Huang Y., Das P.Kr., Bhethanabotla V.R.* Surface acoustic waves in biosensing applications. // Sensors and Actuators Reports. 2021. **3**. 100041.
8. *Gouda M., Ghazzawy H.S., Alqahtani N., Li X.* The Recent Development of Acoustic Sensors as Effective Chemical Detecting Tools for Biological Cells and Their Bioactivities. // Molecules. 2023. **28**. 4855.
9. *Zaitsev B.D., Borodina I.A., Teplykh A.A.* Compact liquid analyzer based on a resonator with a lateral excitation electric field // Ultrasonics. 2022. **126**. 106814.

УДК: 539.261. DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39516

Новый тип изображения рентгеновской дифракции модулированной акустической волной

Д.В. Иржак[a], С.Е. Куманяев[b], К.С. Пундиков[c], Д.В. Рощупкин[d], Р.Р. Фахртдинов[e]

Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН, Московская обл, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, д. 6.

E-mail: [a]irzhak@iptm.ru, [b]skumanyaev2002@mail.ru, [c]kkbhbr2010@yandex.ru, [d]rochtch@iptm.ru, [e]rash@iptm.ru

Аннотация: С помощью рентгеновской топографии на источнике синхротронного излучения изучены изображения поверхностной акустической волны на изогнутом кристалле YZ-среза ниобата лития. Получены топографические изображения, соответствующие кривой качания кристалла с четкими особенностями интенсивности, возникающими вследствие наличия дифракционных сателлитов, возникающих на кривой качания кристалла по причине распространения поверхностной акустической волны. Предложена геометрическая модель для объяснения образования этих особенностей.

Ключевые слова: рентгеновская дифракция, рентгеновская топография, поверхностная акустическая волна

New type of X-ray diffraction image modulated by an acoustic wave

D.V. Irzhak[a], S.E. Kumanyaev[b], K.S. Pundikov[c], D.V. Roshchupkin[d], R.R. Fakhrtdinov[e]

Institute of Microelectronics Technology and High-Purity Materials Russian Academy of Sciences, Ac. Osipian str., 6, Chernogolovka, Moscow District, 142432, Russia

E-mail: [a]irzhak@iptm.ru, [b]skumanyaev2002@mail.ru, [c]kkbhbr2010@yandex.ru, [d]rochtch@iptm.ru, [e]rash@iptm.ru

Abstract: Excitation and propagation of a surface acoustic wave (SAW) on a bent YZ-cut lithium niobate (LiNbO3) crystal are investigated by means of X-ray topography using synchrotron radiation. Topographic images corresponding to the X-ray rocking curve of the crystal are obtained, with distinct intensity features arising from diffraction satellites induced by SAW propagation. A

geometric model is proposed to explain the formation of these features, which result from the interplay between crystal curvature and the angular positions of SAW-induced diffraction satellites.

Keywords: X-ray diffraction, X-ray topography, surface acoustic wave

PACS: 61.05.C

Введение

Рентгеновская топография широко используется для изучения распространения поверхностных акустических волн (ПАВ) в кристаллических материалах [1–6]. Стоячие ПАВ можно визуализировать с помощью лабораторных рентгеновских источников [1], тогда как для визуализации бегущих ПАВ требуются стробоскопические методы, реализуемые с использованием источников синхротронного излучения, где возможна синхронизация между возбуждением ПАВ и рентгеновскими импульсами [2, 3]. Данный подход позволяет анализировать распределение амплитуды ПАВ вдоль акустического пути, а также взаимодействия волнового поля ПАВ с дефектами кристаллической структуры или элементами акустических устройств [4]. Контраст изображения обусловлен как синусоидальным рельефом поверхности [5], так и, в большей степени, периодическими деформациями кристаллической решетки, вызванными распространяющейся ПАВ [6, 7].

В данном исследовании демонстрируется иной принцип визуализации: вместо прямого отображения поля деформации, возникающего вследствие распространения ПАВ. Полученные топограммы соответствуют пространственному представлению кривой качания кристалла. Визуализация ПАВ становится возможной благодаря появлению дифракционных сателлитов на кривой качания, которые пространственно разрешаются на изображении в результате искривления кристалла.

Материалы и методы

Исследования проводились на подложке YZ-среза монокристалла $LiNbO_3$ с размерами 8×12×0.5 мм³. Для возбуждения ПАВ на поверхности кристалла был изготовлен встречно-штыревой преобразователь (ВШП). Апертура ВШП составляла W=60 Λ, N=50 пар электродов и коэффициент металлизации S=0.5 для возбуждения бегущей волны ПАВ с длиной волны Λ=4 мкм. ПАВ возбуждалась с использованием высокочастотного генератора RIGOL DSG815, амплитуда электрического сигнала составляла 2.24 В. Резонансная частота возбуждения f_0=860 МГц соответствовала скорости распространения волны ПАВ V=3488 м/с.

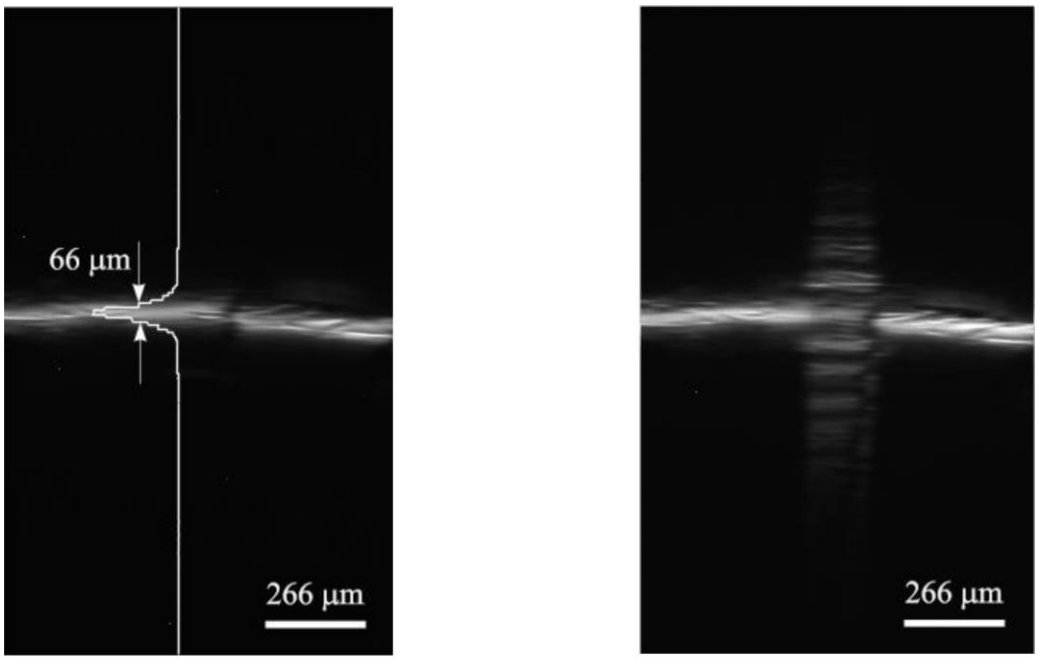
Для визуализации ПАВ и измерения кривой качания использовался высокоразрешающий 2D-детектор Rigaku X Sight Micron LC и рентгеновский двухкристалльный дифрактометр высокого разрешения, установленные на линии

«Рентгеновская кристаллография и физика материалов» (РКФМ) на Курчатовском источнике синхротронного излучения (КИСИ) [8]. Окно 2D-детектора было расположено перпендикулярно дифрагированному пучку. Горизонтальная входная щель перед образцом составляла 2 мм, поэтому рентгеновским излучением освещалась примерно половина поверхности образца. Энергия рентгеновского излучения составляла 12 кэВ. Исследовалось симметричное (300) отражение с межплоскостным расстоянием d=0.15277 нм кристалла $LiNbO_3$.

Экспериментальные результаты

На рис. 1 представлены изображения рентгеновских топограмм кристалла $LiNbO_3$ с отражением (300) при условиях отсутствия (рис. 1, *а*) и распространения (рис. 1, *б*) ПАВ. Изображения были получены при расстоянии между кристаллом и детектором L = 68 см. Видно, что в отсутствие ПАВ ширина дифрагированного пучка составляет всего 66 мкм при полном освещении поверхности кристалла (рис. 1, *а*). Таким образом, лишь часть рентгеновского пучка, падающего на кристалл, удовлетворяет условиям Брэгга и формирует изображение на двумерном детекторе. На основании этого можно сделать вывод, что поверхность кристалла искривлена.

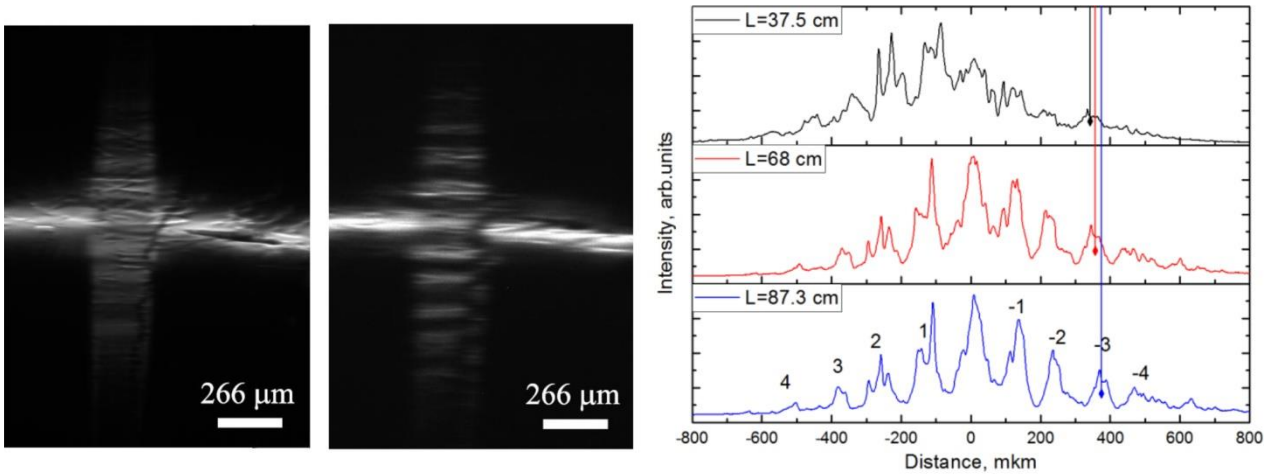
Распространение ПАВ приводит к образованию характерных пиков интенсивности, проявляющихся на изображении в виде периодических полос, расположенных симметрично относительно падающего рентгеновского пучка. Расположение полос соответствует волновому тракту, в котором распространяется ПАВ (рис. 1, *б*). Расстояние между полосами, а также ширина самих полос значительно превышают длину волны ПАВ.



а *б*

Рис. 1. Рентгеновские топограммы дифрагированного пучка без (а) и с распространением ПАВ (б).

На рисунках 2, *а*, *б* представлены изображения, полученные при расстояниях между образцом и входным окном детектора 37.5 см (рис. 2, *а*) и 87.3 см (рис. 2, *б*). На рисунке 2, *в* показаны поперечные сечения распределения интенсивности для различных расстояний между кристаллом и детектором. Видно, что при изменении расстояния между кристаллом и входным окном детектора изменяются ширина полос и расстояние между ними (положение третьей полосы от центра обозначено вертикальными линиями на рисунке 2, *в*).



а *б* *в*

Рис. 2. Рентгеновские изображения поверхностных акустических волн, полученные при расстояниях между образцом и детектором 37 см (а) и 87 см (б); поперечные сечения интенсивности для различных расстояний между образцом и детектором (в).

Ниже будет показано, что эти пики интенсивности на самом деле не являются порядками дифракции, хотя и возникают в результате дифракционных явлений. Однако для дальнейшего обсуждения удобно пронумеровать их аналогично порядкам дифракции.

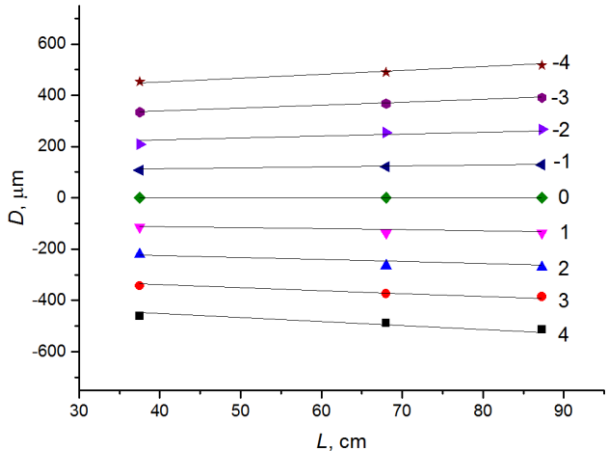


Рис. 3. Зависимость расстояний между полосами от расстояния между образцом и детектором.

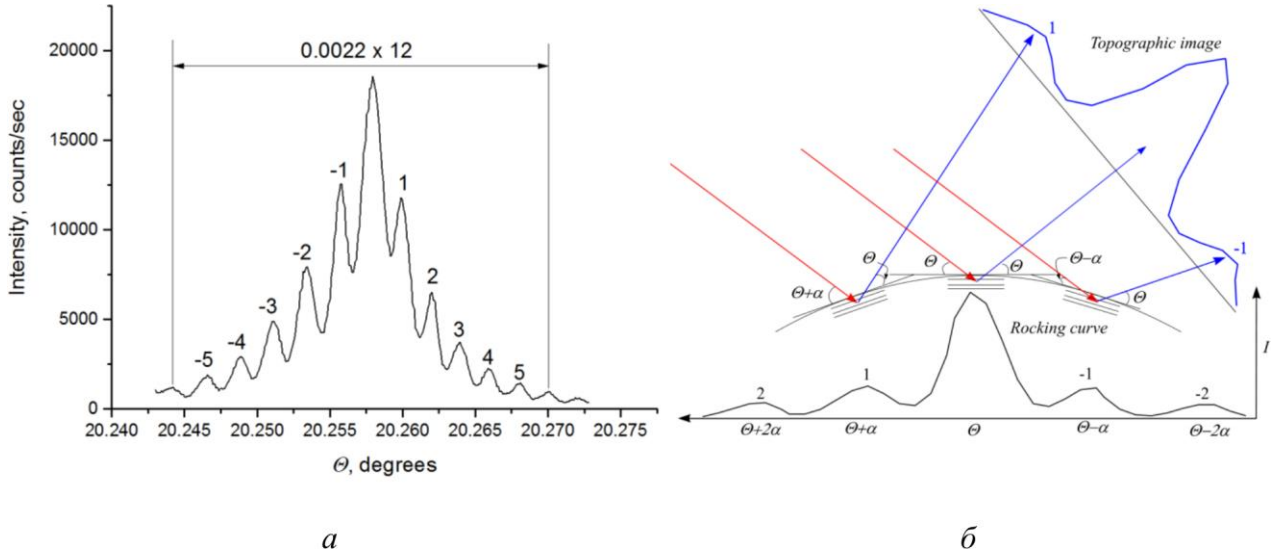
Зависимости расстояний между центральной полосой и обнаруженными пиками интенсивности от расстояния «образец-детектор» для пиков с разными номерами показаны на рисунке 3. Эти расстояния не соответствуют углу между порядками дифракции в случае рентгеновской дифракции на периодической решетке, сформированной на поверхности кристалла, модулированной ПАВ. Таким образом, получаемые изображения представляют собой топограммы, где каждая полоса соответствует определенной области поверхности кристалла. Дифракция приводит к появлению серии расходящихся рентгеновских лучей различной интенсивности, исходящих с поверхности образца.

Дифракция рентгеновского излучения на изогнутом кристалле, промодулированном поверхностной акустической волной. Геометрический подход

Чтобы объяснить наблюдаемое явление, необходимо вспомнить, что распространение ПАВ в кристалле приводит к появлению дифракционных сателлитов, расположенных по обе стороны от главного максимума Брэгга на рентгеновской кривой качания кристалла, на угловом расстоянии

$$\alpha = \delta / \Lambda, \tag{1}$$

где d — межплоскостное расстояние кристалла, Λ — длина волны ПАВ [9]. Кривая качания исследуемого кристалла показана на рисунке 4, *а*. Угловое расстояние между дифракционными сателлитами на кривой качания на рисунке 4 составляет α=0.0022°, что соответствует расчетному значению по выражению (1). Следует отметить, что при измерении кривой качания размер входной щели перед кристаллом составлял 25 мкм.



а *б*

Рис. 4. Кривая колебаний кристалла, модулируемого волной ПАВ (а); схема формирования топографического изображения (б).

Если поверхность кристалла слегка изогнута, то при дифракции плоской монохроматической волны участки поверхности кристалла, промодулированные ПАВ, будут

удовлетворять условиям образования дифракционных сателлитов. В результате от этих участков кристалла будет наблюдаться дифракционное отражение в направлении угла Брэгга, тогда как другие участки кристалла, также модулированные ПАВ, не будут давать такого отражения. Таким образом, формируется изображение, в котором полосы соответствуют дифракционным сателлитам, возникающим в соответствующих участках кристалла. Это схематически показано на рисунке 4, *б*.

С помощью простых геометрических построений можно получить выражение, связывающее радиус кривизны кристалла с измеренными экспериментальными параметрами: расстоянием от кристалла до окна детектора L, расстоянием между центральной полосой (нулевого порядка) и другими полосами на изображении D, углом Брэгга Θ, а также угловым расстоянием между дифракционными сателлитами на кривой колебания кристалла, модулированной ПАВ α:

$$D = \frac{2 \cdot R \cdot \sin(\mathrm{n} \cdot \alpha/2) \cdot \sin(\Theta + \mathrm{n} \cdot \alpha/2)}{\cos(\mathrm{n} \cdot \alpha)} + L \cdot \mathrm{tg}(\mathrm{n} \cdot \alpha) \quad (2)$$

где n — количество дифракционных сателлитов на кривой качания кристалла промодулированного ПАВ, представленной на рисунке 4, *а*.

Зависимости, рассчитанные с помощью выражения (2), показаны на рисунке 3 сплошными линиями. Для предложенной модели коэффициент детерминации составляет r^2=0.9994. Было установлено, что радиус кривизны поверхности кристалла равен R=7.297 м с $CI_{95\%}$=[7.106; 7.489].

Заключение

В результате дифракции рентгеновского излучения на кристалле с изогнутой поверхностью, промодулированной ПАВ, формируется топографическое изображение, являющееся отображением кривой качания кристалла. Расстояние между полосами на изображении определяется геометрической конфигурацией эксперимента: радиусом кривизны поверхности кристалла, углом Брэгга и угловым расстоянием между дифракционными сателлитами на кривой качания кристалла, промодулированного поверхностной акустической волной.

Представленные выше экспериментальные результаты и анализ применимы к выпуклой поверхности кристалла, для которой дифракция генерирует набор расходящихся рентгеновских лучей. Однако эти результаты можно легко дополнить в случае вогнутой поверхности, где дифрагированные лучи, напротив, будут сходиться.

В случае совмещения управления изгибом кристалла с возбуждением ПАВ становится возможным реализовать перестраиваемый рентгеновский оптический элемент, способный

как фокусировать, так и дефокусировать пучок. Более того, поскольку интенсивность дифракционных сателлитов зависит от амплитуды высокочастотного электрического сигнала, используемого для возбуждения ПАВ, предложенная схема позволяет как плавно регулировать интенсивность дифракции, так и осуществлять ее временную модуляцию рентгеновского излучения [10].

Исследования проведены при поддержке Российского научного фонда, грант 25-72-20016.

Список литературы

1. Roshchupkin D. V., Roshchupkina H. D., Irzhak D. V. X-ray topography analysis of acoustic wave fields in the SAW-resonator structures // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. 2005. V. 52. N 11. P. 2081–2087.

2. Roshchupkin D. и др. X-ray imaging of the surface acoustic wave propagation in La3Ga5SiO14 crystal // Applied Physics Letters. 2013. V. 103. N 15.

3. Capelle B. и др. Time resolved synchrotron radiation X-ray topography study of surface acoustic waves propagation. // 2009 IEEE International Frequency Control Symposium Joint with the 22nd European Frequency and Time forum. IEEE, 2009. P. 299–304.

4. Zolotoyabko E., Shilo D., Lakin E. X-ray imaging of acoustic wave interaction with dislocations // Materials Science and Engineering: A. 2001. V. 309–310. P. 23–27.

5. Cerva H., Graeff W. Contrast investigations of surface acoustic waves by stroboscopic topography. I. Orientation contrast // Physica Status Solidi (a). 1984. V. 82. N 1. P. 35–45.

6. Cerva H., Graeff W. Contrast investigations of surface acoustic waves by stroboscopic topography II. Wavefield deviation contrast // physica status solidi (a). 1985. V. 87. N 2. P. 507–516.

7. Cerva H., Graeff W. Contrast Investigations of Surface Acoustic Waves by Strobosocopic Topography (III) // physica status solidi (a). 1986. V. 93. N 2. P. K129–K132.

8. Кон В. Г. и др. Исследование метода двухволновой рентгеновской дифрактометрии с использованием синхротронного излучения // Кристаллография. 2019. Т. 64. № 1. С. 29–34.

9. Schelokov I. A. и др. Dynamical theory for calculations of X-ray spectra from crystals modulated by surface acoustic waves // Journal of Applied Crystallography. 2004. V. 37. N 1. P. 52–61.

10. Zolotoyabko E., Quintana J. P. Control of synchrotron x-ray diffraction by means of standing acoustic waves // Review of Scientific Instruments. 2004. V. 75. N 3. P. 699–708.

УДК: 681.586.48. DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39517

Влияние вязкости жидкости на свойства прямых и обратных акустических волн в пластине ниобата лития

Смирнов А.В.[1,a], Недоспасов И.А. [1,b], Кузнецова И.Е.[1,c]

[1]Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН,
ул. Моховая, 11, стр. 7, Москва, 125009 Российская Федерация
Тел.: +7(909)-332-29-89
E-mail: [a]andre-smirnov-v@yandex.ru, [b] ianedospasov@mail.ru, [c]kuziren@yandex.ru

Развитие современной сенсорной техники стимулирует поиск новых физических принципов детектирования параметров жидких сред. Особый интерес представляют акустоэлектронные устройства на основе акустических волн в пластинах. В отличие от традиционных акустоэлектронных устройств на поверхностных или объемных акустических волнах, использование устройств на акустических волнах в пластинах открывает возможность возбуждения целого набора мод с различной поляризацией с помощью одной пары или единичного встречно-штыревого преобразователя. В возбуждаемом наборе волн можно выделить отдельные моды, обладающие ветвями с аномальной дисперсией. Такие моды, называемые обратными волнами, характеризуются противоположным направлением фазовой и групповой скоростей и обладают высокой чувствительностью к граничным условиям. Несмотря на потенциал практического применения, особенности взаимодействия обратных волн с вязкими жидкими средами остаются малоизученными. В связи с этим актуальной задачей является установление закономерностей влияния вязкости жидкости на характеристики обратных акустических мод в пьезоэлектрических пластинах. Поэтому целью данной работы было теоретическое и экспериментальное исследование влияния жидкости с различной вязкостью на параметры обратной ветви волны A1, возбуждаемой в пластине ниобата лития. Для этого был создан экспериментальный образец, включающий пьезоэлектрическую пластину с нанесенным набором ВШП с длинами волн 0.9-2.7 мм, шаг 0.3 мм, с одной стороны, и измерительную ячейку для жидкости, размещенную на противоположной стороне пластины. На основе дистиллированной воды и глицерина был приготовлен набор экспериментальных жидкостей с различной вязкостью, варьирующейся в диапазоне 0.89-934 сП. Измеренные значения потерь на отражение и фазы акустического сигнала для обратной антисимметричной волны сопоставлялись с характеристиками нескольких прямых волн с различной поляризацией, распространяющихся в той же структуре.

Ключевые слова: обратные акустические волны, волны в пластинах, ниобат лития, аномальная дисперсия, вязкость жидкости

Influence of Liquid Viscosity on the Properties of Forward and Backward Acoustic Waves in a Lithium Niobate Plate

Smirnov A.V.[1a], Nedospasov I.A.[1b], Kuznetsova I.E.[1c]

[1]*Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences*
11, bldg. 7, Mokhovaya St., Moscow, 125009, Russian Federation
Tel.: +7(909)-332-29-89

E-mail: [a]andre-smirnov-v@yandex.ru, [b] ianedospasov@mail.ru, [c]kuziren@yandex.ru

The development of modern sensor technology stimulates the search for new physical principles for detecting parameters of liquid substances. Acoustoelectronic devices based on acoustic waves in plates are of particular interest. Unlike traditional acoustoelectronic devices using surface or bulk acoustic waves, the use of devices based on acoustic waves in plates opens up the possibility of exciting a whole set of modes with different polarizations using a single pair or a single interdigital transducer. Within the excited set of waves, individual modes possessing branches with anomalous dispersion can be distinguished. Such modes, called backward waves, are characterized by opposite directions of phase and group velocities and exhibit high sensitivity to boundary conditions. Despite their potential for practical applications, the interaction features of backward waves with viscous liquid substances remain poorly understood. In this regard, an urgent task is to establish the patterns of the influence of liquid viscosity on the characteristics of backward acoustic modes in piezoelectric plates. Therefore, the aim of this work was a theoretical and experimental study of the effect of liquids with different viscosities on the parameters of the backward branch of the A1 wave excited in a lithium niobate plate. To this end, an experimental sample was created consisting of a piezoelectric plate with a set of interdigital transducers (IDTs) deposited on one side, with wavelengths ranging from 0.9 to 2.7 mm in steps of 0.3 mm, and a liquid measurement cell placed on the opposite side of the plate. Using distilled water and glycerol, a set of experimental liquid substances with viscosities ranging from 0.89 to 934 cP was prepared. The measured values of reflection loss and acoustic signal phase for the backward antisymmetric wave were compared with the characteristics of several forward waves with different polarizations propagating in the same structure.

Keywords: backward acoustic waves, plate waves, lithium niobate, anomalous dispersion, liquid viscosity.

УДК: 534-14 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39518

Экспериментальное исследование чувствительности акустических волн, распространяющихся в слоистых структурах TeO_2-ZnO и TeO_2-Ni-ZnO, к биологическим или вязким жидкостям

И.Е. Кузнецова[1], В.В. Колесов[1], В.И. Анисимкин[1], Н.А. Агейкин[1,a], Е.Р. Дацук[1]

[1] *ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, ул. Моховая, д.11, к. 7, Москва, 125009*

E-mail: [a] ageykin_niki@mail.ru

Аннотация: Экспериментально показана возможность возбуждения акустических волн Лэмба различных порядков в слоистых структурах TeO_2 (110)-Ni-ZnO (h/λ = 0.96) и TeO_2 (001)-ZnO (h/λ = 0.52) в направлениях распространения TeO_2 [001] и [110] соответственно. Исследованы амплитудо-частотные характеристики структур в диапазонах 1…6 и 1…18 МГц. Продемонстрирована способность акустоэлектронных устройств хорошо различать три вида биологических растворов на основе культуральной среды Лурье-Бертрана с добавлением бактериальных клеток *Rhodococcus erythropolis*, *Xanthobacter flavus* и *Methylophilus methylotrophus*. Также показано, что созданные акустоэлектронные устройства для определения свойств вязких жидкостей с микрочастицами Fe_3O_4 позволяют различить чистое силиконовое масло и то же масло с микрочастицами.

Ключевые слова: слоистые структуры, вязкостные датчики, биологические датчики, сенсоры, акустические волны в пластинах.

Experimental study of the sensitivity of acoustic waves propagating in TeO2-ZnO and TeO2-Ni-ZnO layered structures to biological or viscous liquids

I.E. Kuznetsova[1], V.V. Kolesov[1], V.I. Anisimkin[1], N.A. Ageykin[1,a], E.R. Datsuk[1]

[1] *Institute of Radio Engineering and Electronics V.A. Kotelnikov RAS* 11, bldg. 7, Mokhovaya St., Moscow, 125009, Russian Federation

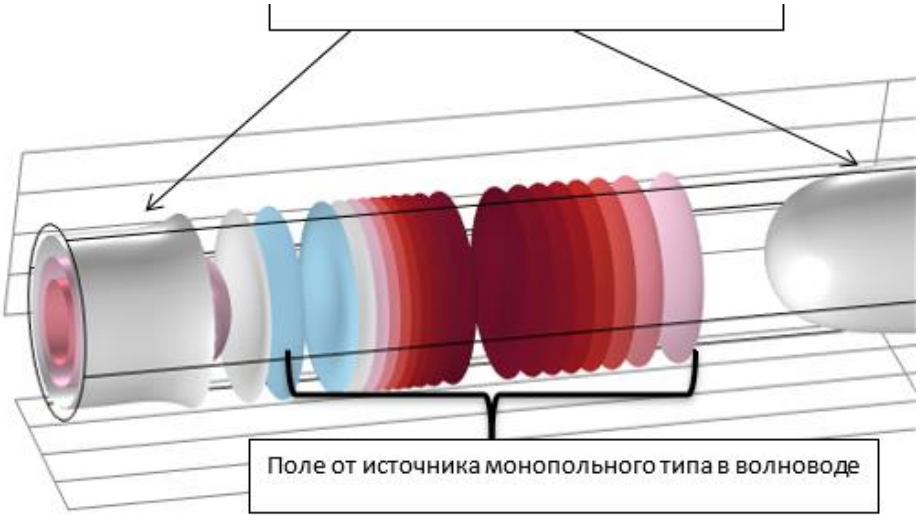
E-mail: [a] ageykin_niki@mail.ru

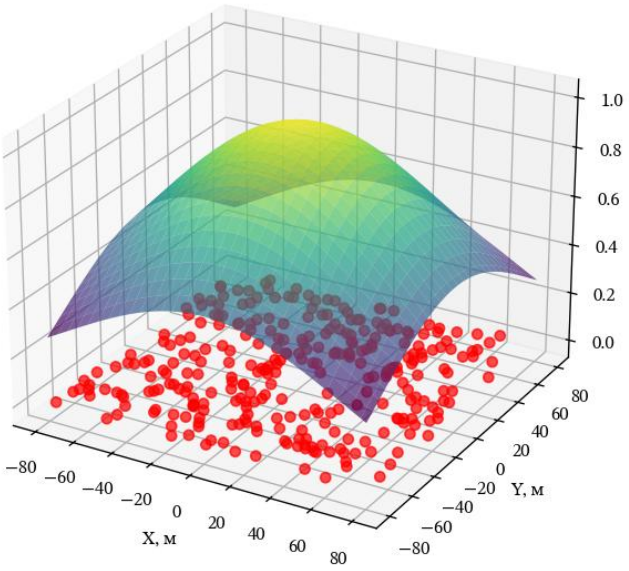
Abstract: The possibility of exciting Lamb acoustic waves of various orders in layered TeO_2 (110)-Ni-ZnO ($h/\lambda = 0.96$) and TeO_2 (001)-ZnO ($h/\lambda = 0.52$) structures along the TeO_2 [001] and [110] propagation directions, respectively, has been experimentally demonstrated. The amplitude-frequency characteristics of the structures were studied in the ranges of 1–6 MHz and 1–18 MHz. The ability of the acoustoelectronic devices to clearly distinguish three types of biological solutions based on Luria-Bertani culture medium with the addition of bacterial cells of *Rhodococcus erythropolis*, *Xanthobacter flavus*, and *Methylophilus methylotrophus* has been demonstrated. It has also been shown that the fabricated acoustoelectronic devices for determining the properties of viscous liquids with Fe_3O_4 microparticles allow distinguishing between pure silicone oil and the same oil with microparticles.

Keywords: layered structures, viscosity sensors, biological sensors, sensors, acoustic plate waves.

Назад к содержанию секции

СЕКЦИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЕ И ДИФРАКЦИЯ ВОЛН





назад к Содержанию

СОДЕРЖАНИЕ СЕКЦИИ РАСПРОСТРАНЕНИЕ И ДИФРАКЦИЯ ВОЛН

1. БИОРТОГОНАЛЬНАЯ АКУСТИКА
Доморацкий Е.В., Богданов А.А.....462

2. О ПРЕОБРАЗОВАНИИ ЧАСТОТЫ ОТРАЖЕННОЙ ВОЛНЫ ПРИ МОДУЛЯЦИИ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ ВО ВРЕМЕНИ И В ПРОСТРАНСТВЕ
Арабаджи В.В. 464

3. ПАРАКСИАЛЬНАЯ ДИФРАКЦИЯ НА ДЕЛЬТА-ПОТЕНЦИАЛЕ
Злобина Е.А., Киселев А.П. 470

4. ИНТЕГРАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ ПЕРВОГО РОДА С ГЛАДКИМИ ЯДРАМИ ДЛЯ УРАВНЕНИЯ ГЕЛЬМГОЛЬЦА В ОГРАНИЧЕННЫХ ОДНОСВЯЗНЫХ ОБЛАСТЯХ
Ватульян А.О., Шамшин В.М.....476

5. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ МАКСИМАЛЬНОЙ ДЛИНЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРОСТРАЕННИЯ ЗВУКА ПРИ НАЛИЧИИ ВЕТРОВОЙ РЕФРАКЦИИ
Денисов С.Л., Берсенев Ю.В., Зайцев М.Ю. 482

6. РАССЕЯНИЕ ЗВУКА НА ВЫТЯНУТОЙ МНОГОСЛОЙНОЙ ОБОЛОЧКЕ ВРАЩЕНИЯ
Клячкин А.В.....484

7. АСИМПТОТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ТРЕХМЕРНЫХ ИНТЕГРАЛОВ С ОСОБЕННОСТЯМИ В ПРИМЕНЕНИИ К ДИФРАКЦИОННОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ ВБЛИЗИ ГОФРИРОВАННОГО ЭКРАНА
Лаптев А.Ю., Шанин А.В. 490

8. РАЗЛОЖЕНИЯ ВОЛНОВЫХ ПОЛЕЙ ПО ПЛОСКИМ ВОЛНАМ
Шанин А.В.....491

9. ПЛОТНОСТЬ АКУСТИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ И ЭФФЕКТЫ КОГЕРЕНТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЗВУКА
Петров М.И., Смагин М.В., Климов Д.А. 493

10. АНАЛИТИЧЕСКАЯ Т-МАТРИЦА ОТКРЫТОГО РЕЗОНАТОРА ГЕЛЬМГОЛЬЦА
Медведева П., Максимов Д.Н., Глазко Л.А., Проскурин А.А., Павлюк А.С., Ли Юн, Петров М.И., Богданов А.А.....495

11. ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЙ РЕЗОНАТОР ГЕЛЬМГОЛЬЦА С МАГНИТОУПРАВЛЯЕМОЙ ГИБКОЙ СТЕНКОЙ
Кузьмин М.В., Цыбуля А.А., Кладько Д.В., Петров М.И.....497

12. РЕЗОНАНСНЫЙ ТУННЕЛЬНЫЙ ЭФФЕКТ В АКУСТИЧЕСКОМ ВОЛНОВОДЕ
Миролюбов М.А., Петров М.И., Богданов А.А. 499

13. ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ ЗВУКОВОГО ИМПУЛЬСА В ВОЛНОВОДЕ С УПРУГИМИ СТЕНКАМИ
Легуша Ф.Ф., Лисенков Н.М., Попов Ю.Н., Чижов В.Ю.....501

14.О ЗАВИСИМОСТИ АКУСТИЧЕСКИХ МОД ОТ ПАРАМЕТРОВ СРЕДЫ В ВОЛНОВОДЕ ПЕКЕРИСА — ЭЙРИ
Заворохин Г.Л., Мацковский А.А., Петров П.С., Захаренко А.Д., Dosso S.E. 507

15. ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ РЕШЕНИЙ ДИФРАКЦИОННЫХ ЗАДАЧ АКУСТИКИ НА ОСНОВЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗВУКОВЫХ ВОЛН
Окороков М.В., Скобельцын С.А. 512

16. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИИ РЕЗОНАТОРОВ ГЕЛЬМГОЛЬЦА НА ИХ АКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ
Глазко Л.А., Ли Юн, Хватов А.А., Богданов А.А. 518

17. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗВУКОВОГО УДАРА ОТ ДЕМОНСТРАТОРА СВЕРХЗВУКОВОГО ГРАЖДАНСКОГО САМОЛЕТА В УСЛОВИЯХ СИЛЬНОЙ АТМОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ
Корунов А.О., Гусев В.А. 520

18. МОДЕЛИ ОЦЕНКИ СРЕДНЕЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ДИСКРЕТНЫХ ДОННЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ПРИ АКУСТИЧЕСКОМ МОНИТОРИНГЕ ДНА
Грязнова И.Ю., Лабутина М.С., Сечин Е.М.....528

УДК: 534 DOI: 10.34756/GEOS.2026.17.39519

Биортогональная акустика

Е.В. Доморацкий[1,a], А.А. Богданов[1,2,b]

[1] *Университет ИТМО.г. Санкт-Петербург, 191002, Россия.*
[2] *Харбинский инженерный университет. г. Циндао, 266000, Китай.*
E-mail: [a]evdomoratskii@gmail.com, [b]a.bogdanov@metalab.ifmo.ru

Аннотация: Современные задачи акустики, в частности, проектирование активных метаматериалов и акустических приемников и излучателей на их основе, разработка параметрических акустических антенн требуют проведения анализа спектра резонансных частот и собственных мод открытых резонаторных структур. Подобные системы характеризуются диссипацией энергии, что приводит к наличию комплексного спектра собственных частот физической системы.

Строгое математическое описание подобных акустических задач ранее предложено в рамках теории *PT*-симметрии [1,2], а численное решение таких задач основано на формализме квазинормальных мод и активно используется в том числе и в анализе акустических резонансных структур [3]. Недостатком существующей методики является необходимость разложения собственных мод возбужденной системы по базису квазинормальных мод, что требует использования значительных вычислительных ресурсов.

В настоящей работе развивается общий подход к описанию открытых акустических систем, основанный на биортогональном формализме [4]. В рамках развиваемой теории решается задача по поиску собственных частот и собственных мод неэрмитового оператора, описывающего произвольную акустическую систему, а также сопряженного к нему оператора. Их собственные частоты являются комплексно-сопряженными, а собственные моды удовлетворяют условию биортогональности. На примере расчета спектра собственных частот цилиндрического акустического резонатора демонстрируется, что развиваемый подход не требует разложения по неортогональным модам, а также корректно учитывает граничные условия открытых неэрмитовых систем, что позволяет проводить анализ систем с произвольной геометрией и распределением параметров среды.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №25-79-31027.

1. *J. Christensen, M. Willatzen, V. R. Velasco, M.-H. Lu*. Parity-time synthetic phononic media. Phys. Rev. Lett. 2016. **116**, N 20. P. 207611.
2. *X. Zhu, H. Ramezani, C. Shi, J. Zhu, X. Zhang*. PT-Symmetric Acoustics. Phys. Rev. X. 2014. **4**, N 3. P. 031042.
3. *H. S. Vieira, K. Destounis, K. D. Kokkotas*. Perturbing the vortex: quasinormal and quasibound spectra of rotating acoustic geometries. Phys. Rev. D. 2025. **111**, N. 10. P. 104025.

4. *D. C. Brody*. Biorthogonal quantum mechanics. Jour. of Phys. A. 2014. **47**, N 3. P 035305 (2013).

Ключевые слова: неэрмитова физика, неэрмитова акустика, открытые резонаторы

Biorthogonal acoustics

E.V. Domoratsky[1,a], A.A. Bogdanov[1,2,b]

[1] *ITMO University. Saint-Petersburg, 191002, Russia.*
[2] *Harbin engineering university. Qingdao, 266000, China.*
E-mail: [a]evdomoratskii@gmail.com, [b]a.bogdanov@metalab.ifmo.ru

Abstract: Modern problems in acoustics – particularly the design of active metamaterials, as well as acoustic receivers and emitters based on them, and the development of parametric acoustic antennas – require analysis of the spectrum of resonant frequencies and eigenmodes of open resonant structures. Such systems are characterized by energy dissipation, which leads to a complex spectrum of the system's eigenfrequencies.

A rigorous mathematical description of such acoustic problems was previously proposed within the framework of PT-symmetry theory [1,2], while their numerical solution is based on the formalism of quasinormal modes and is widely used, including in the analysis of acoustic resonant structures [3]. A drawback of the existing methodology is the need to expand the eigenmodes of the excited system in terms of a basis of quasinormal modes, which requires significant computational resources.

In this work, a general approach to the description of open acoustic systems is developed based on the biorthogonal formalism [4]. Within the proposed theory, the problem of finding the eigenfrequencies and eigenmodes of a non-Hermitian operator describing an arbitrary acoustic system, as well as its adjoint operator, is solved. Their eigenfrequencies are complex conjugates, and the eigenmodes satisfy the biorthogonality condition. Using the example of calculating the eigenfrequency spectrum of a cylindrical acoustic resonator, it is demonstrated that the proposed approach does not require expansion in non-orthogonal modes and correctly accounts for the boundary conditions of open non-Hermitian systems. This makes it possible to analyze systems with arbitrary geometry and spatial distributions of medium parameters.

This work was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 25-79-31027.

1. *J. Christensen, M. Willatzen, V. R. Velasco, M.-H. Lu*. Parity-time synthetic phononic media. Phys. Rev. Lett. 2016. **116**, N 20. P. 207611.
2. *X. Zhu, H. Ramezani, C. Shi, J. Zhu, X. Zhang*. PT-Symmetric Acoustics. Phys. Rev. X. 2014. **4**, N 3. P. 031042.
3. *H. S. Vieira, K. Destounis, K. D. Kokkotas*. Perturbing the vortex: quasinormal and quasibound spectra of rotating acoustic geometries. Phys. Rev. D. 2025. **111**, N. 10. P. 104025.
4. *D. C. Brody*. Biorthogonal quantum mechanics. Jour. of Phys. A. 2014. **47**, N 3. P 035305 (2013).

Keywords: non-Hermitian physics, non-Hermitian acoustics, open resonators
PACS: 43.20.+g

УДК: 534-13 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39520

О преобразовании частоты отраженной волны при коммутации граничных условий во времени и в пространстве

В.В. Арабаджи

Институт прикладной физики РАН, 603951 Нижний Новгород,

ул. Ульянова 46, Тел.: 952 765 29 77; Факс: +7 831 436 59 76

E-mail: v.v.arabadzhi@appl.sci-nnov.ru

Рассматриваются задачи об отражении плоской монохроматической звуковой волны, нормально падающей на плоскую границу с параметрами, модулированными в пространстве (а) и во времени (б). В задаче (а) волна падает на плоскость, составленную из чередующихся идеально мягких и идеально жестких параллельных бесконечных полос одинаковой ширины. Поэтому происходит преобразование вверх пространственной частоты отраженной волны, которая превращается в нераспространяющуюся волну и затухает динамически. В задаче (б) волна падает на плоскость, которая периодически мгновенно вся становится либо идеально твердой, либо идеально мягкой. Поэтому происходит преобразование вверх временной частоты отраженной волны, которая затухает диссипативно, благодаря вязкости среды. Рассматриваются также и некоторые парадоксальные аспекты задач (а) и (б) связанные с поглощением энергии падающей волны.

Ключевые слова: коммутация граничных условий в пространстве и времени.

ON THE FREQUENCY CONVERSION OF A REFLECTED WAVE UNDER MODULATION OF BOUNDARY CONDITIONS IN TIME AND IN SPACE

Arabadzhi V.V.

Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Department of Geophysical Research, 603950 Nizhny Novgorod, Ulyanov St. 46,

E-mail: v.v.arabadzhi@appl.sci-nnov.ru

The problems of reflection of a plane monochromatic sound wave normally incident on a plane boundary with parameters modulated in space (a) and in time (b) are considered. In problem (a), the wave falls on a plane boundary composed of alternating ideally soft and ideally hard parallel infinite strips of equal width. Therefore, the spatial frequency of the reflected wave is up-converted, becoming an reflected wave and decaying dynamically. In problem (b), the wave is incident on a plane that periodically and instantaneously becomes either perfectly hard as whole or all perfectly

soft as whole. Therefore, the temporal frequency of the reflected wave is transformed upward, attenuating dissipatively due to the viscosity of the medium. Some paradoxical aspects of problems (a) and (b) related to the absorption of the incident wave's energy are also considered.

Key words: modulation of boundary conditions in time and space, transformation of temporal or spatial frequency of the reflected wave.

PACS: 43.29.Fn, 43.20.Tb, 43.30.Ky, 43.40.Fz, 43.55.Ev, 43.20.Px, 02.60.Nm.

Введение

Наиболее известны и исследованы случаи медленной (с временным масштабом, многократно превышающим период модулируемой волны): модуляции амплитуды, частоты, фазы высокочастотных сигналов или волн [1], [2]. Ниже мы рассматриваем быструю модуляцию (коммутацию) граничных условий, непрозрачных, не зависящих от частоты, неизлучающих для волноведущей невязкой сжимаемой среды без дисперсии: мягкая граница с заданным нулевым давлением на ней и жесткая граница с заданной нулевой нормальной колебательной скоростью. Комбинация соприкасающихся между собой в пространстве или во времени мягких интервалов времени (пространства) и жестких интервалов времени (пространства) в присутствии падающей волны рассматривалась достаточно редко [3]–[6]. Ниже будут рассмотрены две краевые линейные задачи для звуковых волн в сжимаемой среде без дисперсии с модуляцией (коммутацией) граничных условий, т.е. периодическим скачкообразным переключением в пространстве (с периодом $2L_0$, включая «мягкий» и «жесткий» полупериоды, раздел 1) или во времени (с периодом, $2T_0$ раздел 2) граничных условий между идеально мягким и идеально жестким состоянием соприкасающихся областей плоской границы $z = 0$, на которую нормально падает плоская звуковая монохроматическая волна (с частотой $\omega_\text{I} << (\pi / T_0),\ (c_0\pi / L_0)$, где c_0 –скорость звука) давления $P_\text{I}(z,t) = \hat{P}_\text{I} \exp(\text{i}\,\omega_\text{I} t + \text{i}\,k_\text{I} z)$ и скорости $V_\text{I}(z,t) = \hat{V}_\text{I} \exp(\text{i}\,\omega_\text{I} t + \text{i}\,k_\text{I} z)$ с волновым вектором $\mathbf{k}_\text{I} \downarrow\uparrow \mathbf{z}_0$ ($\left|\mathbf{k}_\text{I}\right| = k_\text{I} = \omega_\text{I} / c_0 = 2\pi / \lambda_\text{I}$, $\hat{P}_\text{I} / \hat{V}_\text{I} = \rho_0 c_0$, ρ_0–плотность среды, λ_I–длина волны) и амплитудами $\hat{P}_\text{I}$, $\hat{V}_\text{I}$. В разделе 1 (рис. 1) краевая задача определяется уравнением $\varphi''_{xx} + \varphi''_{zz} + k_0^2 \varphi = 0$, где комплексные амплитуды монохроматических скоростей υ_x, υ_z частиц (вдоль осей "x", "z") и волновое давление p определяются потенциалом $\varphi(x,z)\exp(i\omega_0 t)$ ($\upsilon_x = -(\partial / \partial x)\varphi$, $\upsilon_z = -(\partial / \partial z)\varphi$, $p = \text{i}\,\omega_0 \rho_0 \varphi$) и условиями $[1 + \phi(x / L_0)]\ P_\text{B}(x) + [1 - \phi(x / L_0)]\ V_\text{B}(x / L_0) = 0$ для комплексных амплитуд давления $P_\text{B}(x) = [p]_{z=0}$ и нормальной скорости $V_\text{B}(x) = [\upsilon_z]_{z=0}$ на границе $z = 0$, где $\phi(\eta) = \text{sgn}[\cos(\pi\eta)] = \pm 1$, $\eta = x / L_0$–биполярный меандр, симметричный относительно точки $x = 0$ (т.е. $\phi(\eta) = \phi(-\eta)$) с

периодом $2L_0$, причем $\phi(0)=1$, $\mathrm{sgn}(\eta<0)=-1$, $\mathrm{sgn}(\eta>0)=1$. В разделе 2 (рис. 2) задача определяется уравнением $\varphi''_{zz}-c_0^{-2}\varphi''_{tt}=0$ для потенциала и условием $[1-\phi(t/T_0)]\ P_B(t)+[1+\phi(t/T_0)]\ V_B(t)=0$ для давления $P_B(t)=\rho_0[\varphi'_t]_{z=0}$ и нормальной скорости $V_B(t)=-[(\partial/\partial z)\varphi]_{z=0}$ частиц (где $\phi=\phi(\eta)=\mathrm{sgn}[\cos(\pi\eta)]$, $\eta=t/T_0$, рис. 2,д) на границе $z=0$.

1. Пространственная модуляция параметров границы (2D, монохроматическое поле)

Разделим границу (плоскость $z=0$) на бесконечные (вдоль оси $"y"$) параллельные полосы равной ширины L_0 (по оси $"x"$): четные полосы $\hat{\hat{L}}_n=\hat{\hat{L}}_n\{[(2n)-1]L_0/2)\le x<[(2n)+1]L_0/2)\}$ и нечетные полосы $\hat{L}_n=\hat{L}_n\{[(2n+1)-1])L_0/2\le x<[(2n+1)+1]L_0/2\}$, где $n=0,\pm1,\pm2,\ldots$. Четные полосы $\hat{\hat{L}}_n$ (включая $\hat{\hat{L}}_0$ с $\phi(0)=1$) –мягкие (с нулевым давлением), а нечетные полосы $\hat{L}_n$ будут фиксированы по координате $z=0$. Рассмотрим отдельно две задачи: (а) на однородную жесткую плоскость $z=0$ нормально падает плоская звуковая волна давления P_I и скорости V_I, образуя однородное по границе $z=0$ (вдоль осей $"x"$, $"y"$) поле стоячей волны с давлением $2P_I$; (б) в отсутствии падающей волны на всех четных полосах $\hat{\hat{L}}_n$ задано одинаковое распределение (паттерн) $\Phi_0(2x/L_0,t)$ комплексных амплитуд нормальных скоростей. При этом нечетные полосы остаются неподвижными, а на четных полосах давление распределено равномерно (или равномерно распределены модуль и фаза комплексной амплитуды давления). Наша задача – найти такое одинаковое для всех четных полос распределение (паттерн) $\Phi_0(2x/L_0,t)$ нормальных скоростей только на четных полосах, чтобы все вместе четные полосы создавали в каждой точке каждой четной полосы в любой момент времени звуковое давление $-2P_I$, противоположное давлению $2P_I$ стоячей волны из вышеупомянутой задачи (а) на четных полосах. Тогда, согласно принципу суперпозиции, суммируя звуковые поля задач (а) и (б) на границе $z=0$, мы получили бы четные полосы «мягкими». При этом нам неважно, какое давление может установится на нечетных полосах (с заданной нулевой нормальной скоростью). Такая постановка задачи неизвестна, но удалось подобрать аналитический вид искомого паттерна нормальных скоростей для четных полос: $\Psi_0(\xi,t)=A_0\ \mathrm{I}(1-\xi^2)\ (1-\xi^2)^{-1/2}\exp(\mathrm{i}\,\omega_0 t)$ (где $\xi=2x/L_0$, A_0–комплексная амплитуда скорости в точке $x=0$). Учитывая пространственную периодичность (с периодом $2L_0$) по оси $"x"$ скоростей и давлений а также симметрию паттерна Ψ_0 относительно точки $x=0$, разложим в ряды Фурье скорость $V_B(x)=<V_B(x)>_{\mathbf{x}}+\sum_{m=1}^{M}\tilde{\upsilon}_m\cos(mx\pi/L_0)$ границы и давление $P_B(x)=<P_B(x)>_{\mathbf{x}}+\sum_{m=1}^{M}\tilde{p}_m\cos(mx\pi/L_0)$ с соответствующими обозначениями: $<\ >_{\mathbf{x}}$–усреднение по

периоду $2L_0$ на оси "x", $< V_{\rm B}(x) >_{\mathbf{x}} = A_0\pi/4$, $\tilde{\upsilon}_{\rm m} = A_0\pi\ {\rm J}_0({\rm m}\,\pi/2)/2$ (${\rm J}_0(\alpha)$–функция Бесселя первого рода нулевого порядка), $< P_{\rm B}(x) >_{\mathbf{x}} = \rho_0 c_0 < V_{\rm B}(x) >$, $\tilde{p}_{\rm m} = {\rm i}\,\upsilon_{\rm m}\rho_0 c_0[(\lambda_0\,{\rm m}/2L_0)^2 - 1]^{-1/2}$. Как видно из рис. 1в,г найденный паттерн обеспечивает (причем, чем больше м, тем лучше, рис. 1,г) постоянство по оси "x" модуля $\left|p(x)/p(0)\right|$ и фазы $\arg[\,p(x)/p(0)]$ звукового давления на четных полосах $\hat{\hat{L}}_{\rm n}$ (задача (а)). Однако при увеличении м возрастает скачок амплитуды $V(x)/V(0)$ нормальной скорости границы $z=0$ на переходе от четной полосы $\hat{\hat{L}}_{\rm n}$ к нечетной $\hat{L}_{\rm n}$ (рис. 1,а), что затрудняет практическое решение задачи. Далее сложим поля задач (а), (б) и подобрав амплитуду A_0, обеспечить равенство $P_{\rm B} + P_{\rm I} = 0$ для всех $x \in \hat{\hat{L}}_{\rm n}$. Нетрудно убедиться, что граница с паттернами Ψ_0 создает отраженную волну с потоком мощности, равным потоку мощности отраженной волны при $\Psi_0 = 0$ (как в задаче (а)), т.е. не поглощает.

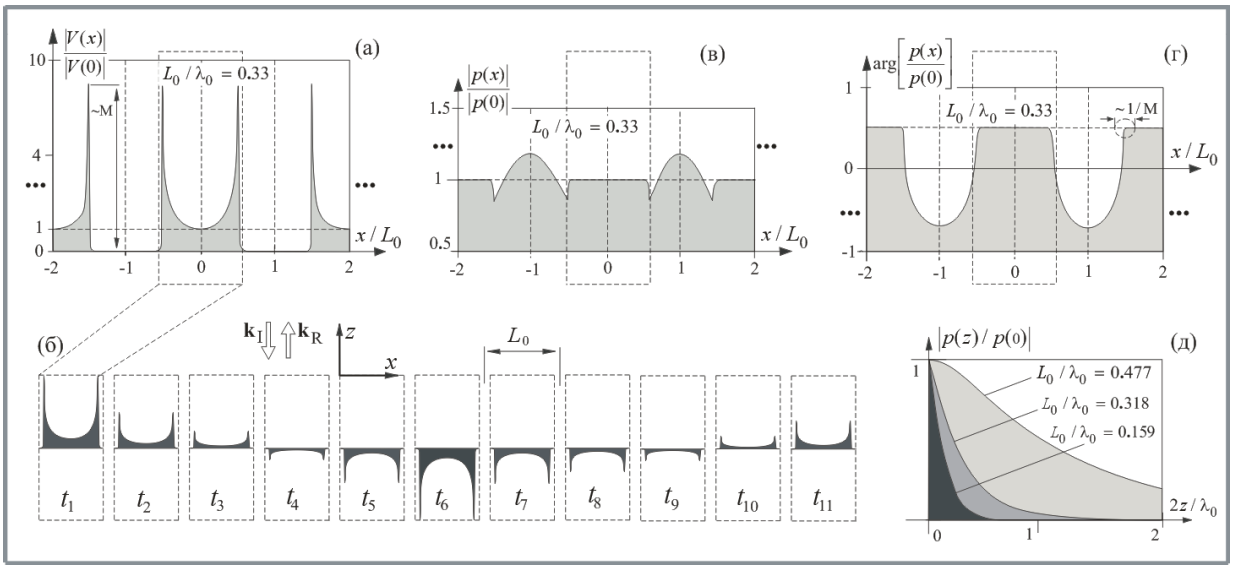


Рис. 1. Модуляция параметров границы в пространстве: (а) вид паттернов (1) нормальной скорости на границе $z=0$; (б) синусоидальные осцилляции скорости паттерна (1) «четной» полосы (пространственные распределения скорости в моменты времени $t_1 < t_2 < ... < t_{11}$); (в) одинаковый постоянный модуль амплитуды давления на «четных» полосах, обеспечиваемый паттернами (1) на «четных полосах»; (г) одинаковая постоянная фаза давления, обеспечиваемая паттернами (1) на «четных полосах»; (д) спад звукового давления при удалении $z>0$ от границы $z=0$ при различных размерах L_0/λ_0 полос.

2. Модуляция параметров границы во времени (1D, широкополосное поле)

Пусть при $z<0$ импеданс среды равен $\hat{Z}$, а полупространство $z>0$ заполняет сжимаемая среда с импедансом $\rho_0 c_0 >> \hat{Z}$. Невесомый идеально жесткий «поршень» неограниченной ширины обеспечивает контроль положения границы $z=0$ раздела сред. При отсутствии звуковой волны граница раздела сред находится в точке $z=0$. Слева направо на границу $z=0$ нормально падает плоская волна. Разделим ось "t" на бесконечную последовательность чередующихся жестких «нечетных» (${\rm n} = 0,\pm1,\pm2,...$) $\hat{T}_{\rm n} = \hat{T}_{\rm n}\{[(2\,{\rm n}+1)-1])T_0/2 \le x < [(2\,{\rm n}+1)+1]T_0/2\}$ и мягких «четных» $\hat{\hat{T}}_{\rm n} = \hat{\hat{T}}_{\rm n}\{[(2\,{\rm n})-1]T_0/2) \le x < [(2\,{\rm n})+1]T_0/2)\}$ интервалов длительностью T_0.

Коммутацию граничного условия между состояниями $P_{\mathrm{B}}(t)=0$ и $V_{\mathrm{B}}(t)=0$ в точке $z=0$ осуществляет устройство (рис. 2,а,б). При этом координата $\mathrm{z}_{\mathrm{B}}(t)$ поршня плавно смещается в мягком «четном» интервале $\hat{\hat{T}}_{\mathrm{n}}$ с удвоенной скоростью $(d/dt)\,\mathrm{z}_{\mathrm{B}}(t)=V_{\mathrm{B}}(t)=2V_{\mathrm{I}}(0,t)$ частиц в падающей волне (рис. 2,а). А при переходе в некоторый момент в жесткий «нечетный» интервал $\hat{T}_{\mathrm{n}}$ координата $\mathrm{z}_{\mathrm{B}}(t)$ поршня фиксируется (мгновенно останавливается, $(d/dt)\,\mathrm{z}_{\mathrm{B}}(t)=V_{\mathrm{B}}(t)=0$) в текущем на момент переключения положении, испытывая после остановки удвоенное давление падающей волны $P_{\mathrm{B}}(t)=2P_{\mathrm{I}}(0,t)$. Такая коммутация (рис. 2,в2,г2), не совершает работу над границей, не поглощает и не излучает волны. Нетрудно проверить, что спектральная плотность мощности отраженных волн (рис. 2,д3) с множеством волновых чисел $k_{\mathrm{R}}=(\omega_0\,\mathrm{n}\pm\omega_{\mathrm{I}})/c_0$ ($\mathrm{n}=\pm1,\pm3,\pm5,\ldots$) сосредоточена вблизи частот $\omega=(\mathrm{n}\,\pi/T_0)\pm\omega_0$, на которых проявляется вязкость среды (не учитываемая в данной модели), приводящая к диссипативному затуханию поля отраженных волн.

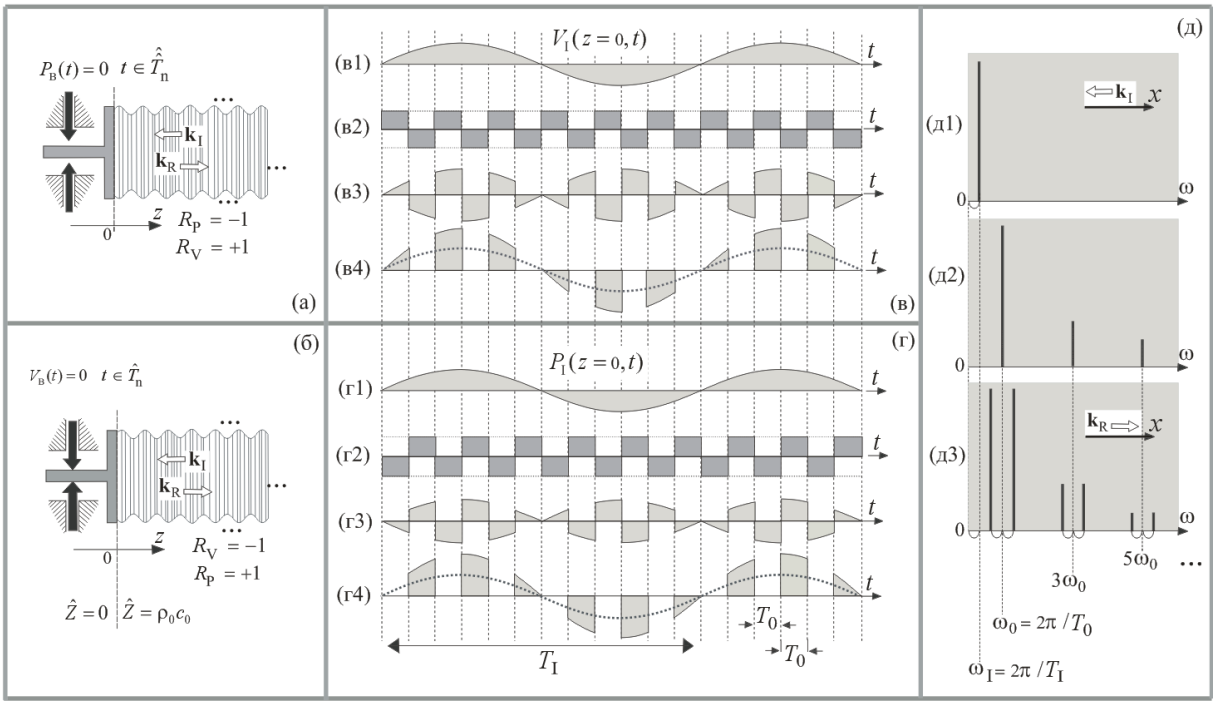


Рис. 2. Модуляция параметров границы во времени. Переключатель граничного условия в положении «мягкая граница» (в «четных» интервалах $t\in\hat{\hat{T}}_{\mathrm{n}}$ (а). Переключатель граничного условия в положении «твердая граница» (в «нечетных» интервалах $t\in\hat{T}_{\mathrm{n}}$). R_{V}, $R_{\mathbf{P}}$ –коэффициенты отражения по скорости и по давлению. Эпюры скорости и параметров границы (в): скорость $V_{\mathrm{I}}(0,t)$ частиц в падающей волне (в1); коэффициент отражения по скорости (в2); скорость $V_{\mathrm{R}}(0,t)$ частиц в отраженной волне (в3); скорость границы в отраженной (в4). Эпюры скорости и параметров границы (в); давление $P_{\mathrm{I}}(0,t)$ в падающей волне (г1); коэффициент отражения по давлению (г2); давление $P_{\mathrm{R}}(0,t)$ в отраженной волне (г3); давление $P_{\mathrm{B}}(t)$ на границе (г4). Нормированные спектральные плотности мощности: падающей волны (д1); модулирующего меандра (д2); отраженной волны (д3).

Длина затухания высокочастотных отраженных волн может быть гораздо меньше, чем длина затухания низкочастотной падающей волны. Таким образом, мы получаем активную систему гашения (поглощения средой) падающей волны, не зная ее частоту и фазу [4]–[6].

Заключение

Найден паттерн Ψ_0 для нормальной скорости мягкой полосы (в решетке мягких и жестких полос, раздел 1), который верен не только для предполагаемой выше малой волновой ширины $k_0 L_0 \ll 1$ полосы, но также и для любой ширины полосы $k_0 L_0$. Парадоксальность случая с модуляцией во времени (раздел 2) заключается в противоречии двух подходов. С одной стороны по определению ни в какой точке $z = 0$ границы ни в какой момент времени не совершается какая-либо работа: либо $P_{\text{B}}(t) = 0$, либо $V_{\text{B}}(t) = 0$, т.е. $P_{\text{B}}(t)V_{\text{B}}(t) = 0$ *в любой точке границы и в любой момент времени***.** С другой стороны, нетрудно заметить, что при $\omega_0 \ll (\pi / T_0)$ средняя на интервале $2T_0$ скорость V_{B} (см. рис. 2,в,б4) (давление P_{B}, см. рис. 2,г,4) границы $z = 0$ приближается к скорости частиц V_{I} (давлению P_{I}) в падающей волне, что означает поглощение низкочастотной падающей волны и отсутствие отражений на любых частотах. Сформулировано решение 1D задачи активного гашения отраженной волны (раздел 2), не требующее информации о параметрах гасимой волны и может иметь толщину активной зоны гораздо меньше длины падающей волны.

Работа была выполнена по госзаданию FFUF-2024-0035.

Список литературы

1. *Гоноровский И. С.* Радиотехнические цепи и сигналы. Москва. Радио и Связью. М., 1986.
2. *Фрёман Н., Фрёман П.У.* ВКБ приближение. Мир. М., 1967.
3. *Kaijun Yi, Manuel Collet, and Sami Karkar* Frequency conversion induced by time-space modulated media // Phys. Rev. B 96, 104110 (2017) doi: 10.1103/PhysRevB.96.104110
4. *Арабаджи В.В.* О гашении низкочастотных волн в лабораторных бассейнах //Изв. РАН "Физика Атмосферы и Океана", т. 28, №12, 1992, С. 1205.
5. *Arabadzhi V.V.* Four Algorithms for Boundary Control with Breaking in Space and Time // Journal of Applied Mathematics and Physics, 2019, **7**, N. 11, P. 2891. doi**:** 10.4236/jamp.2019.711198
6. *Arabadzhi V.V.* Solutions to Problems of Controlling Long Waves with the Help of Micro-Structure Tools, Bentham Science Publishers, 2011. doi: 10.2174/978160805275211101017

УДК: 534.26, 534.8 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39521

Параксиальная дифракция на дельта-потенциале

Е.А. Злобина[1,a], А.П. Киселев[2,3,b]

[1] *Санкт-Петербургский государственный университет. 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7–9.*

[2] *Санкт-Петербургское отделение математического института им. В.А. Стеклова РАН. 191023, Санкт-Петербург, наб. р. Фонтанки, д. 27.*

[3] *Институт проблем машиноведения РАН. 199178, Санкт-Петербург, Большой пр. Васильевского острова, д. 61.*

E-mail: [a]ezlobina2@yandex.ru, [b]kiselev@pdmi.ras.ru

Аннотация: Исследуется, в параксиальном приближении, задача дифракции гармонической высокочастотной плоской волны на тонкой протяженной неоднородности среды. Неоднородность моделируется с помощью дельта-сингулярности коэффициента преломления, сосредоточенной на полупрямой. Поле описывается параболическим уравнением с дельта-потенциалом. Построено его явное решение, которое подробно исследовано асимптотически для всех значений комплексного коэффициента при дельта-потенциале. Полученные асимптотические формулы проинтерпретированы с дифракционной точки зрения и сопоставлены с результатами, полученными для задач дифракции на импедансном экране и на полупрозначном экране. Отмечены некоторые эффекты, не имеющие аналогов в упомянутых дифракционных задачах. Обсуждаются условия применимости метода параболического уравнения.

Ключевые слова: высокочастотная дифракция, метод параболического уравнения, параксиальное приближение, дельта-потенциал.

Paraxial diffraction on a delta potential

E.A. Zlobina[1,a], A.P. Kiselev[2,3,b]

[1] *St.Petersburg State University. St.Petersburg 199034, Universitetskaya emb. 7-9, Russia.*

[2] *St. Petersburg Department of V.A.Steklov Institute of Mathematics of RAS. St.Petersburg 191023, Fontanka 27, Russia.*

[3] *Institute for Problems in Mechanical Engineering of RAS. St.Petersburg 199178, Boljshoy prospekt V.O. 61, Russia*

E-mail: [a]ezlobina2@yandex.ru, [b]kiselev@pdmi.ras.ru

Abstract: Diffraction of a high-frequency harmonic plane wave on a thin inhomogeneity of a medium is investigated in the paraxial approximation. The inhomogeneity is modeled by a delta singularity of the refractive index supported on the half line. The wave field is described by a parabolic equation with a delta potential. An explicit solution is constructed, which is investigated asymptotically in detail for all values of complex coefficient of the delta potential. The asymptotic findings are qualitatively interpreted using diffraction terminology and quantitatively compared with the results obtained for diffraction problems on an impedance screen and on a semitransparent screen. Some effects that have no analogs in the related diffraction problems are noted. Some effects that have no analogues in the mentioned diffraction problems are noted. Conditions of applicability of the parabolic equation method are discussed.

Keywords: high-frequency diffraction, parabolic equation approach, paraxial approximation, delta potential

PACS: 02.30.Mv, 43.20.El

Введение

Мы рассматриваем задачу, моделирующую двумерную дифракцию высокочастотной плоской волны $e^{ik(x\cos\alpha - y\sin\alpha)}$ на неоднородности среды – тонком слое, окружающем положительную полуось *Ox*. Здесь и далее гармоническая зависимость от времени $e^{-i\omega t}$ опущена. Слой моделируется с помощью дельта функции $\delta(y)$, при этом волновое поле $w(x,y)$ допускает описание уравнением Гельмгольца с дельта-потенциалом и большим волновым числом *k*. Точное интегральное представление для решения можно получить в рамках метода Зоммерфельда–Малюжинца (см., напр., [1]) или метода Винера–Хопфа (см., например, [2]), однако эти подходы довольно громоздки, а в полученных интегралах будут фигурировать сложные специальные функции – функции Малюжинца. Наша цель – предполагая, что $0 \leqslant \alpha \ll 1$, описать поле в узкой окрестности положительно полуоси *Ox* с помощью более простой техникой. Действуя в рамках метода параболического уравнения (см., например, [3]), мы выделяем быструю продольную осцилляцию $w(x,y) = e^{ikx}u(x,y)$ и получаем следующую задачу для множителя ослабления *u*:

$$2iku_x + u_{yy} + 2k\eta\delta(y)u = 0, \tag{1}$$

$$u\big|_{x=0} = e^{-iky\alpha}. \tag{2}$$

Здесь η – постоянный коэффициент, характеризующий свойства тонкого слоя. Подобная задача рассматривалась ранее в [4] в случае касательного падения ($\alpha = 0$) гауссовского пучка, но только для $\eta = iq$, $q > 0$, что соответствует поглощению энергии. Мы же, имея в

виду прогресс в создании метаматериалов, исследуем решение (1), (2) при всевозможных комплексных значениях $\eta \neq 0$:

$$\eta = p + iq, \qquad p, q \in \mathbb{R}. \tag{3}$$

Доклад основан на результатах статьи [5].

1 Точное решение задачи (1), (2)

Мы строим точное решение задачи (1), (2) с помощью стандартных интегральных преобразований. Выполняя преобразование Лапласа по x и преобразование Фурье по y, приходим к следующему выражению для u:

$$u = e^{-ik\left(y\alpha + x\frac{\alpha^2}{2}\right)} - \frac{i\eta}{i\eta - \alpha} F^{\alpha} - \frac{i\eta}{i\eta + \alpha} F^{-\alpha} + \frac{2\eta^2}{\eta^2 + \alpha^2} F^{i\eta}. \tag{4}$$

Здесь

$$F^{\mu}(x, y) = e^{i\frac{kx}{2}\tau^2 - i\sigma^2(\tau)} \Phi(\sigma(\tau)), \qquad \sigma(\tau) = -\sqrt{\frac{kx}{2}}\left(|\tau| - \mu\right), \qquad \tau = \frac{y}{x}, \tag{5}$$

и $\Phi(z)$ – интеграл Френеля [6]:

$$\Phi(z) = \frac{e^{-i\frac{\pi}{4}}}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{z} e^{is^2} ds.$$

Отметим, что в случае $q > 0$ и $\alpha = q$ (см. (3)) выражение (4) для u принимает вид

$$u = e^{-ik\left(y\alpha + x\frac{\alpha^2}{2}\right)} + \frac{1}{2} F^{-\alpha} - \frac{1}{2} F^{\alpha} + \alpha \frac{\partial}{\partial \alpha} F^{-\alpha},$$

а в случае $q < 0$ и $\alpha = -q$, который мы называем резонансным,

$$u = e^{-ik\left(y\alpha + x\frac{\alpha^2}{2}\right)} - \frac{1}{2} F^{-\alpha} + \frac{1}{2} F^{\alpha} + \alpha \frac{\partial}{\partial \alpha} F^{\alpha}. \tag{6}$$

2 Асимптотическое исследование *u*

Асимптотическое исследование построенного решения проведено при $kx \gg 1$ для различных значений η. В зависимости от соотношений между η, α и $|\tau|$, один или несколько интегралов Френеля в (4) заменяются асимптотикой (см. [7]). Выделяется семь случаев с существенно различной структурой асимптотики u, см. [5]. Здесь мы кратко обсудим два из них.

2.1 Случай $p > q \geq 0$

Области, в которых аппроксимации u имеют разный вид, схематично показаны на рис. 1, *а*.

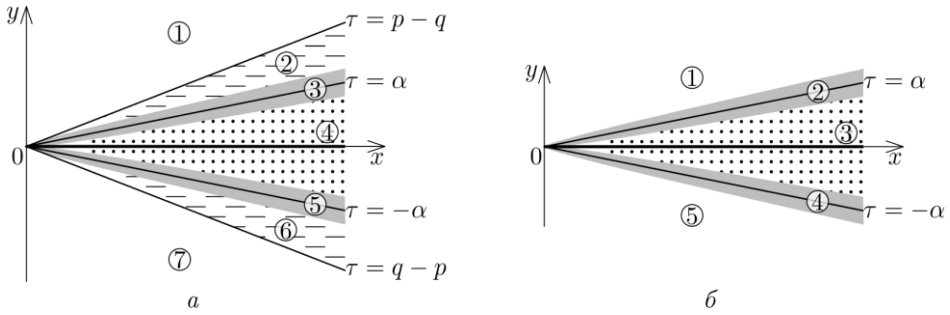


Рис. 1. Схематичное изображение областей с разной структурой поля: *а* – в случае потенциала с $p > q \geqslant 0$ (для определенности считается, что $\alpha < p - q$); *б* – в резонансном случае $p = 0$, $q < 0$ и $\alpha = -q$.

В области 4, окружающей тонкий слой, где $\sqrt{kx}(\alpha - \tau) \gg 1$, асимптотика u дается выражением

$$u = \theta(y)\left(u^{\mathrm{i}} + u^{\mathrm{r}}\right) + \theta(-y)u^{\mathrm{t}} + u^{\mathrm{d}} + \breve{u}^{\mathrm{d}} + u^{\mathrm{s}}, \tag{7}$$

где θ – функция Хевисайда, $\theta(y) = 1$ при $y > 0$ и $\theta(y) = 0$ при $y < 0$. Здесь

$$u^{\mathrm{i}} = e^{-ik\left(y\alpha + x\frac{\alpha^2}{2}\right)} \tag{8}$$

отвечает падающей волне,

$$u^{\mathrm{r}} = -\frac{i\eta}{i\eta - \alpha} e^{ik\left(y\alpha - x\frac{\alpha^2}{2}\right)}, \qquad u^{\mathrm{t}} = -\frac{\alpha}{i\eta - \alpha} e^{-ik\left(y\alpha + x\frac{\alpha^2}{2}\right)} \tag{9}$$

– отраженной и прошедшей волнам,

$$u^{\mathrm{d}} = \frac{2i\eta}{\sqrt{2\pi kx}(\tau^2 - \alpha^2)} e^{i\frac{kx}{2}\tau^2 + i\frac{\pi}{4}} \left(1 + O\left(\frac{1}{kx(|\tau| - \alpha)^2}\right)\right), \tag{10}$$

$$\breve{u}^{\mathrm{d}} = -\frac{2\eta^2}{\sqrt{2\pi kx}(\tau^2 - \alpha^2)(|\tau| - i\eta)} e^{i\frac{kx}{2}\tau^2 + i\frac{\pi}{4}} \left(1 + O\left(\frac{\alpha^2 + \tau^2 + |\eta|^2}{kx(|\tau| - \alpha)^2(|\tau| - i\eta)^2}\right)\right) \tag{11}$$

– краевым волнам, расходящимся от края слоя (величина τ введена в (5)), и

$$u^{\mathrm{s}} = \frac{2\eta^2}{\eta^2 + \alpha^2} e^{-kp(|y| + qx) - ik\left(q|y| + \frac{q^2 - p^2}{2}x\right)} \tag{12}$$

– поверхностной волне. Отметим, что u^s мало в области $kp(|y| + qx) \gg 1$, см. (3).

В областях 3 и 5, где величина $\sqrt{kx}|\tau - \alpha|$ не велика, интеграл Френеля в функции F^{α} (см. (4), (5)) асимптотикой не заменяется, что соответствует слиянию падающей волны с отраженной и прошедшей волнами. В областях 4 и 5, где $\sqrt{kx}(\tau - \alpha) \gg 1$, асимптотика u дается суммой $u = u^i + u^d + \breve{u}^d + u^s$, а в областях 1 и 7 $u = u^i + u^d + \breve{u}^d$ (поверхностная волна отсутствует).

При $\alpha \ll 1$ амплитуды выражений u^r и u^t согласуются с амплитудами отраженной от полупрозрачного экрана волны и прошедшей сквозь него волны, см. [2]. При $|\eta| \ll 1$

выражение $e^{ikx}u^s$ согласуется с выражением для поверхностной волны в случае импедансного экрана, см. [1, 8].

2.2 Резонансный случай $p=0$, $q<0$, $\alpha=-q$

В резонансном случае решение u задачи (1), (2) дается формулой (6). Области, в которых асимптотические выражения для u имеют разный вид, схематично показаны на рис. 1, *б*.

В области 3, окружающей тонкий слой, где $\sqrt{kx}(\alpha-\tau)\gg 1$, асимптотика u дается выражением $u=\theta(y)\left(u^{\mathrm{i}}+\tilde{u}^{\mathrm{r}}\right)+\theta(-y)\tilde{u}^{\mathrm{t}}+u^{\mathrm{d}}+\breve{u}^{\mathrm{d}}$, где u^{i}, u^{d} и $\breve{u}^{\mathrm{d}}$ введены в (8), (10), (11), соответсвенно, а

$$\tilde{u}^{\mathrm{r}}=\left(\frac{1}{2}+ik\alpha(y-\alpha x)\right)e^{ik\left(y\alpha-x\frac{\alpha^2}{2}\right)},\qquad \tilde{u}^{\mathrm{t}}=\left(\frac{3}{2}-ik\alpha(y+\alpha x)\right)e^{-ik\left(y\alpha+x\frac{\alpha^2}{2}\right)},$$

ср. (9). Таким образом, в резонансном случае слагаемые, отвечающие отраженной и прощедшей волнам, имеют линейно растущие по *x* и *y* амплитуды. Плоские волны с такими амплитудами уже встречались в теории дифракции, см., например, [9, 10]. В областях 1 и 5, где $\sqrt{kx}(\tau-\alpha)\gg 1$, $u=u^i+u^d+\breve{u}^d$, а в областях 2 и 4, где величина $\sqrt{kx}\left|\tau-\alpha\right|$ не велика, в асимптотике u присутствует слагаемое

$$\alpha\sqrt{\frac{kx}{2\pi}}e^{i\frac{kx}{2}\tau^2-i\frac{\pi}{4}},$$

соответствующее краевой волне, у которой амплитуда растет с расстоянием.

3 Область применимости метода параболического уравнения

Мы исследовали вопрос, при каких ограничениях функция $w(x,y)=e^{ikx}u(x,y)$, где u – построенный нами множитель ослабления (4), является в строгом смысле асимптотическим решением уравнения Гельмгольца, т.е. невязка при подстоновке в него функции *w* мала. Мы установили, что это имеет место при $p\leqslant q$ (см. (3)), $|\eta|\ll 1$ и $\alpha\ll|\eta|$ в узкой окрестности слоя, где $kx\tau^2\ll 1$, $k|\eta||y|\ll 1$, $kx\gg|\eta|^{2/3}$, см. [5].

Заключение

Задача (1), (2) решена явно и детально исследована асимптотически при всех комплексных значениях коэффициента η при дельта-потенциале. При некоторых значениях параметров η, α обнаружены неожиданные эффекты. Во-первых, в случае потенциала с $q<0$ (см. (3)) вблизи лучей $y=\pm qx$ возникают переходные зоны со сложной структурой поля. Во-вторых, при $\eta=iq$, $\alpha=-q$ наблюдаются эффекты резонансного типа, такие как появление плоских

волн с линейно растущими по x и y амплитудами и цилиндрических волн с амплитудой, растущей как $\sqrt{x}$. При ограничениях, согласующихся со стандартными предположениями параксиального подхода, показано, что построенное решение параболического уравнения дает асимптотическое решение соответствующего уравнения Гельмгольца.

Список литературы

1. *Бабич В.М., Лялинов М.А., Грикуров В.Э.* Метод Зоммерфельда–Малюжинца в теории дифракции. Санкт-Петербургский государственный университет. СПб., 2003.
2. *Senior T.B.A., Volakis J.L.* Approximate Boundary Conditions in Electromagnetics. Institute of Electrical Engineers. London, 1995.
3. *Фок В.А*. Проблемы дифракции и распространения электромагнитных волн. Советское радио. М., 1970.
4. *Шалашов А.Г., Господчиков Е.Д.* “Аномальная” диссипация параксиального волнового пучка, распространяющегося вдоль поглощающей плоскости. // Успехи физических наук. 2022. **192**, №12. С. 1399.
5. *Zlobina E.A., Kiselev A.P.* Paraxial diffraction on a delta potential. // Russian Journal of Mathematical Physics. 2025. **32**, N 3. P.597.
6. *Боровиков В.А., Кинбер Б.Е*. Геометрическая теория дифракции. Связь. М., 1978.
7. *Olver F.W.G., Lozier D.W., Boisvert R.F., Clark Ch.B. (ed.)* NIST Handbook of Mathematical Functions. Cambridge University Press. Cambridge, 2010.
8. *Norris A.N., Osipov A.V.* Far-field analysis of the Malyuzhinets solution for plane and surface waves diffraction by an impedance wedge. // Wave Motion. 1999. **30**, N 1. P. 69.
9. *Киселев А.П.* Плоские волны с поперечной структурой в произвольно анизотропной упругой среде. // Доклады РАН. 2008. **418,** №3. С. 336.
10. *Коузов Д.П., Соловьева Ю.А.* Дифракция нестационарной линейно неоднородной акустической волны, соскальзывающей с мягкого полубесконечного экрана. // Прикл матем. Мех. 2014. **78**, №5. С. 681.

УДК: 539.3:534.1 + 517.968.2 + 519.642 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39522

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ ПЕРВОГО РОДА С ГЛАДКИМИ ЯДРАМИ ДЛЯ УРАВНЕНИЯ ГЕЛЬМГОЛЬЦА В ОГРАНИЧЕННЫХ ОДНОСВЯЗНЫХ ОБЛАСТЯХ

А. О. Ватульян[1,a], **В. М. Шамшин**[2,b]

[1] *ФГАОУ ВО "Южный федеральный университет", г. Ростов-на-Дону 344006, Россия.*

[2] *ГБПОУ РО "Ростовский-на-Дону колледж связи и информатики",*

г. Ростов-на-Дону 344082, Россия.

E-mail: [a]aovatulyan@sfedu.ru, [b]ufocombat@gmail.com

Аннотация: На основе альтернативных граничных интегральных уравнений (АГИУ) 1-го рода с гладкими ядрами разработана численная схема метода граничных элементов для уравнения Гельмгольца в двумерных и трехмерных областях. Показано, что граничная формулировка приводит к некорректной задаче в смысле Адамара; для регуляризации применена обобщенная схема А. Н. Тихонова. Резонансные частоты определены с точностью 10^{-3}, граничные значения функций восстановлены с точностью 10^{-2}. Проведена верификация сопоставлением с методом конечных элементов и классическим методом ГИУ.

Ключевые слова: Уравнение Гельмгольца, метод граничных элементов, интегральные уравнения первого рода, гладкие ядра, собственные частоты, сингулярные числа, регуляризация Тихонова.

FIRST-KIND INTEGRAL EQUATIONS WITH SMOOTH KERNELS FOR THE HELMHOLTZ EQUATION IN BOUNDED SIMPLY CONNECTED DOMAINS

A. O. Vatulyan[1,a], **V. M. Shamshin**[2,b]

[1] *Southern Federal University, Rostov-on-Don 344006, Russia.*

[2] *Rostov-on-Don College of Communications and Informatics, Rostov-on-Don 344082, Russia.*

E-mail: [a]aovatulyan@sfedu.ru, [b]ufocombat@gmail.com

Abstract: A boundary element method scheme based on alternative first-kind boundary integral equations with smooth kernels is developed for the Helmholtz equation in two- and three-dimensional domains. The boundary formulation is shown to be ill-posed in the sense of Hadamard; Tikhonov's generalized regularization is employed. Resonant frequencies are determined to an accuracy of 10^{-3}, boundary values recovered to 10^{-2}. Verification is carried out by comparison with FEM and the classical boundary integral equation method.

Keywords: Helmholtz equation, boundary element method, first-kind integral equations, smooth kernels, natural frequencies, singular values, Tikhonov regularization.

PACS: 46.15.-x, 46.40.Ff, 02.60.Nm, 02.70.Pt

Введение

Метод граничных интегральных уравнений (ГИУ) является одним из наиболее эффективных подходов к решению краевых задач математической физики, позволяющим снизить размерность задачи на единицу. В классическом подходе краевые задачи о колебаниях сводятся к системам интегральных уравнений, ядра которых строятся на основе фундаментальных решений [7] и обладают сингулярностями при $r \to 0$. Необходимость обработки сингулярностей усложняет численную реализацию, а для анизотропных сред фундаментальное решение, как правило, не выражается в замкнутой форме.

В работах [1, 2, 3, 4] предложен принципиально иной подход — альтернативные ГИУ (АГИУ). Применение преобразования Фурье и теоремы Гаусса–Остроградского приводит к интегральным уравнениям первого рода на границе области с гладкими ядрами вида $e^{ik(\mathbf{x},\mathbf{d})}$, не содержащими сингулярностей. Это делает подход особенно привлекательным для анизотропных сред [3]. Вместе с тем полученные уравнения Фредгольма 1-го рода приводят к некорректности задачи в смысле Адамара [5].

Для преодоления некорректности использована регуляризация А.Н. Тихонова [5] с введением стабилизирующего функционала. Исследование спектральных свойств дискретизованного оператора посредством SVD позволяет контролировать обусловленность системы и находить резонансные частоты.

Цель работы — разработать численную схему метода граничных элементов на основе АГИУ [1, 2, 3] для уравнения Гельмгольца в областях произвольной формы и провести верификацию результатов сопоставлением с МКЭ и классическим методом ГИУ.

1 Формулировка ГИУ

1.1 Постановка задачи

Пусть $V \subset \mathbb{R}^n$ $(n = 2.3)$ — ограниченная односвязная область с достаточно гладкой границей $\partial V = S_1 \cup S_2$. Рассмотрим смешанную краевую задачу для уравнения Гельмгольца: найти функцию $u \in C^2(V) \cap C^1(\overline{V})$, удовлетворяющую

$$\Delta u + k^2 u = 0 \quad \text{в } V, \qquad u = f \quad \text{на } S_1, \qquad \frac{\partial u}{\partial \mathbf{n}} = g \quad \text{на } S_2, \tag{1}$$

где $k > 0$ — волновое число, $f \in C(S_1)$, $g \in C(S_2)$ — заданные функции, $\mathbf{n}$ — внешняя нормаль к ∂V; k^2 не совпадает с собственными значениями спектральной задачи.

Применяя к (1) преобразование Фурье и теорему Гаусса–Остроградского, получаем

$$\hat{u}(\boldsymbol{\alpha}) = \frac{1}{(k^2 - |\boldsymbol{\alpha}|^2)} \int_{\partial V} \left[\frac{\partial u}{\partial \mathbf{n}} - i(\boldsymbol{\alpha} \cdot \mathbf{n})\, u \right] e^{i\boldsymbol{\alpha}\cdot\mathbf{x}}\, dS, \tag{2}$$

где $\hat{u}(\boldsymbol{\alpha}) = \int_V u(\mathbf{x})\, e^{i\boldsymbol{\alpha}\cdot\mathbf{x}}\, dV$ — преобразование Фурье функции u, целая аналитическая функция. Соотношение (2) имеет полярное множество при $|\boldsymbol{\alpha}| = k$. Требуя обращения числителя в нуль при $\boldsymbol{\alpha} = k\mathbf{v}$, $\mathbf{v} \in \mathbb{S}^{n-1}$, получаем условие разрешимости:

$$\int_{\partial V} \left[\frac{\partial u}{\partial \mathbf{n}} - ik(\mathbf{v} \cdot \mathbf{n})\, u \right] e^{ik\mathbf{v}\cdot\mathbf{x}}\, dS = 0, \quad \forall\, \mathbf{v} \in \mathbb{S}^{n-1}.$$

С учетом граничных условий (1) разделим интегрирование по ∂V:

$$\int_{S_1} \left[\frac{\partial u}{\partial \mathbf{n}} - ik(\mathbf{v} \cdot \mathbf{n})\, f \right] e^{ik\mathbf{v}\cdot\mathbf{x}}\, dS + \int_{S_2} \left[g - ik(\mathbf{v} \cdot \mathbf{n})\, u \right] e^{ik\mathbf{v}\cdot\mathbf{x}}\, dS = 0. \tag{3}$$

Соотношение (3) представляет собой АГИУ 1-го рода с гладкими ядрами $e^{ik\mathbf{v}\cdot\mathbf{x}}$ относительно граничных функций. Интегральный оператор (3) принадлежит классу операторов Гильберта–Шмидта ($\sigma_j \to 0$ при $j \to \infty$), поэтому при переходе от краевой задачи (1) к граничной формулировке (3) возникает некорректная задача в смысле Адамара, требующая применения методов регуляризации.

2 Дискретизация и анализ системы

2.1 Схема метода граничных элементов

Дискретизация ГИУ (3) проводится стандартным методом граничных элементов: неизвестные граничные функции аппроксимируются конечным набором из N базисных функций (ортогональные полиномы или кусочно-постоянные функции), коллокация по $M > N$ направлениям $\mathbf{v}_q$ на $\mathbb{S}^{n-1}$ приводит к переопределенной системе линейных уравнений. Число базисных функций N выступает параметром естественной регуляризации некорректной задачи.

2.2 Анализ обусловленности и определение резонансов

Для определения резонансных частот задача (1) рассматривается в однородной постановке ($f \equiv 0,\ \ g \equiv 0$). Сингулярное разложение (SVD) дискретизованной матрицы системы позволяет выявлять резонансы по минимумам наименьшего сингулярного числа $\sigma_N(k)$. Для устойчивого выявления близко расположенных резонансов введена суммарная метрика [9]:

$$R_\Sigma(k) = \sum_{i=1}^{N-1} \left(1 - \frac{\sigma_{i+1}(k)}{\sigma_i(k)} \right). \tag{4}$$

Пики $R_\Sigma(k)$ соответствуют резкому падению одного или нескольких сингулярных чисел; широкий пик или расщепление указывает на кратность резонанса.

2.3 Методы регуляризации

Для устойчивого решения применяется метод регуляризации А. Н. Тихонова [5] — минимизация функционала

$$\Omega[\mathbf{x}] = \| \mathbf{x} \|^2 + \beta \ \| \mathbf{D}\,\mathbf{x} \|^2 \to \min, \qquad (5)$$

где $\beta > 0$ — параметр регуляризации, $\mathbf{D}$ — матрица конечно-разностной аппроксимации производной вдоль границы. Параметр β выбирается на основе принципа невязки, метода L-кривой [5] или GCV [8].

Наряду с этим ограничение числа базисных функций N интерпретируется как *проекционная регуляризация*: конечномерная аппроксимация оператора обеспечивает ограниченность псевдообратного оператора, тогда как исходный обратный оператор неограничен. Оптимальный выбор N определяется из баланса аппроксимационной точности и обусловленности — аналогично принципу невязки Морозова [6].

3 Вычислительные эксперименты

Рассмотрены крутильные колебания бочкообразного цилиндра с профилем $R(z) = a(1 + \varepsilon \sin(\pi z/L))$. Параметры стального цилиндра: $E = 200$ ГПа, $\nu = 0.30$, $\rho = 7800$ кг/м³ ($c_T = 3140$ м/с); радиус $a = 50$ мм, длина $L = 200$ мм, параметр бочкообразности $\varepsilon = 0.1$. Задача симметрична относительно $\eta = z/L = 0.5$ и решается на $[0,\ 0.5]$. Касательное напряжение $\sigma(\eta)$ аппроксимируется кусочно-линейными функциями с шагом $1/32$.

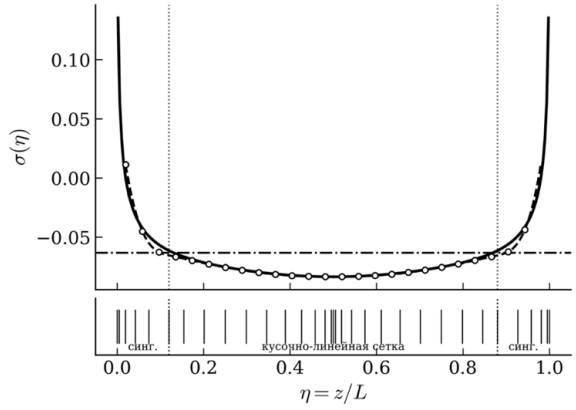


Рис. 1. Тяга на боковой поверхности бочки. Сплошная линия — МКЭ, штрих с кружочками — АГИУ 1-го рода, штрихпунктир — точное τ для цилиндра; внизу — узлы дискретизации σ на боковой поверхности со сгущением, “синг.” — зоны угловой особенности.

В окрестности ребер (угол 94.5°) возникает степенная особенность ($\alpha \approx 0.048$), для учета которой введены 8 сингулярных базисных функций вида $\eta^{-\alpha} \cdot T_k(\eta/\eta_c) \cdot (1 - \eta/\eta_c)^3$, где T_k — полиномы Чебышева ($k = 0 \ldots 7$), $\eta_c = 0.12$. Регуляризация (5) — штраф по второй конечной разности (D2) с автоматическим выбором параметра по GCV ($\beta \approx 1.5 \times 10^{-5}$).

При $\varepsilon = 0$ решение ГИУ совпадает с точным аналитическим решением для цилиндра (погрешность перемещений $\sim 10^{-6}$). При $\varepsilon = 0.1$ на боковой поверхности касательное напряжение приобретает корытообразную форму с минимумом в центре и ростом вблизи ребер (рис. 1). Относительная L_2-погрешность σ: 3.2 % во внутренней области, максимальная 7.9 %; погрешность перемещений 0.3 %.

Резонансные частоты определяются по пикам суммарной метрики (4) (табл. 1). У бочки первая мода цилиндра ($n = 1$) расщепляется на два пика: 35.8 и 39.7 кГц (рис. 2). Остальные моды сдвигаются вниз на 7–8 % без расщепления.

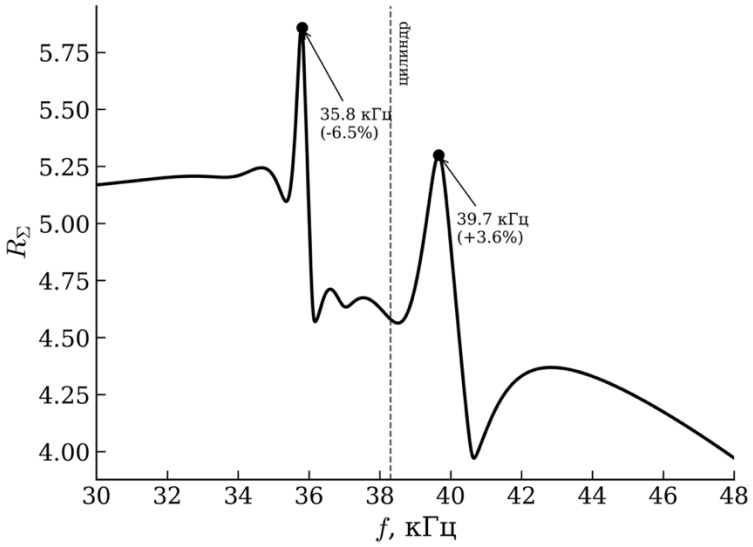


Рис. 2. Суммарная метрика резонанса $R_\Sigma(f)$ бочкообразного цилиндра ($\varepsilon = 0.1$) в окрестности первой крутильной моды; штриховая вертикальная линия — частота цилиндра (38.3 кГц), черные точки — расщепленные пики при 35.8 кГц (–6.5 %) и 39.7 кГц (+3.6 %).

Таблица 1. Резонансные частоты крутильных колебаний (кГц)

n	Цилиндр	Бочка ($\varepsilon = 0.1$)	Сдвиг, %
1*	38.3	35.8 / 39.7	–6.5 / +3.6
2	70.1	64.9	–7.5
3	101.7	93.5	–8.1
4	133.2	122.6	–8.0
5	164.6	150.9	–8.4

Заключение

На основе АГИУ 1-го рода с гладкими ядрами [1, 2, 3] разработана численная схема метода граничных элементов для уравнения Гельмгольца в ограниченных односвязных областях.

Граничная формулировка некорректна в смысле Адамара; для получения устойчивых решений применена регуляризация А.Н. Тихонова [5] со стабилизирующим функционалом. Предложены SVD-метрики для детектирования резонансных частот. Вычислительные эксперименты показали точность определения частот 10^{-3} и восстановления граничных функций 10^{-2}. Расхождение с классическим методом ГИУ менее 1 %. Отсутствие потребности в фундаментальном решении делает метод перспективным для анизотропных сред и областей со сложной геометрией.

Список литературы

1. Ватульян А.О., Шамшин В.М. Новый вариант граничных интегральных уравнений и их применение к динамическим пространственным задачам теории упругости // Прикл. математика и механика. 1998. Т. 62. № 3. С. 112–119.
2. Ватульян А.О., Садчиков Е.В. О граничных интегральных уравнениях в акустике // Акуст. журн. 1998. Т. 44. № 3. С. 326–330.
3. Ватульян А.О. О граничных интегральных уравнениях 1-го рода в динамических задачах анизотропной теории упругости // Докл. АН. 1993. Т. 333. № 3. С. 312–314.
4. Бабешко В.А. Обобщенный метод факторизации в пространственных динамических смешанных задачах теории упругости. М.: Наука, 1984. 256 с.
5. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. 2-е изд. М.: Наука, 1979. 285 с.
6. Морозов В.А. Регулярные методы решения некорректно поставленных задач. М.: Наука, 1987. 240 с.
7. Colton D., Kress R. Integral Equation Methods in Scattering Theory. New York: John Wiley & Sons, 1983. 271 p. [Переиздание: Philadelphia: SIAM, 2013]
8. Golub G.H., Heath M., Wahba G. Generalized Cross-Validation as a Method for Choosing a Good Ridge Parameter // Technometrics. 1979. V. 21. № 2. P. 215–223. DOI: 10.1080/00401706.1979.10489751
9. Grubisic L., Hiptmair R., Renner D. Detecting Near Resonances in Acoustic Scattering // J. Sci. Comput. 2023. V. 96. Art. 81. DOI: 10.1007/s10915-023-02284-5

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39523

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ МАКСИМАЛЬНОЙ ДЛИНЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗВУКА ПРИ НАЛИЧИИ ВЕТРОВОЙ РЕФРАКЦИИ

Денисов С.Л.[1)], **Берсенев Ю. В.** [1)], **Зайцев М.Ю.**[1)]
[1)]*ФАУ «ЦАГИ» НИЦ аэроакустики, ул. Радио 17, Москва, 105005 Россия*
E-mail: aeroacoustics@tsagi.ru

Распространение звука на открытой местности подвержено воздействию различных факторов (атмосферное затухание, локальные колебания температуры и порывы ветра на трассе распространения сигнала и др.), которые не всегда удается корректно воспроизвести в лабораторных условиях, что препятствует детальному изучению их влияния на особенности распространения звука. Наличие нестационарных порывов ветра, скорость и направление которого существенно меняется, может привести к значительному искажению регистрируемых звуковых сигналов, вплоть до полной потери возможности их обнаружения из-за попадания измерительного микрофона в ветровую тень, появление которой вызвано ветровой рефракцией. Следовательно, изучение влияние ветра на распространение звука является важной проблемой, для исследования которой необходимо развитие как теоретических, так и экспериментальных методов, использование которых позволит корректно учитывать влияние ветрового воздействия на результаты акустических измерений на открытой местности. В данной работе представлены результаты применения метода последовательностей максимальной длины к проблеме распространения звука при наличии нестационарных порывов ветра. На основе анализа экспериментальных данных предложена простая модель распространения звука при наличии порывов ветра, которая может применяться для оценки ветровой обстановки при проведении акустических измерений на открытой местности.

Ключевые слова: MLS - (Maximum Length Sequence - метод последовательностей максимальной длины) эксперимент, ветровая рефракция

MAXIMUM LENGTH SEQUENCE METHOD APPLICATION TO SOUND PROPAGATION INVESTIGATION IN CASE OF WIND REFRACTION

Denisov S. L.[1], **Bersenev Yu. V.**[1], **Zaytsev M. Yu.**[1]
[1)]*Central Aerohydrodynamic Institute named after Professor N.E. Zhukovsky, Acoustic Dept., 17 Radio Street, Moscow, 105005 Russia*
E-mail: aeroacoustics@tsagi.ru

Sound propagation in an open area is affected by various factors (atmospheric attenuation, local temperature fluctuations and wind gusts along the signal propagation path, etc.), which cannot always be reproduced correctly in the laboratory. These factors prevent a detailed study of their affect on the

characteristics of sound propagation. The presence of non-stationary wind gusts can lead to the significantly changing of gusts speed and direction of propagation. Also it can lead to significant distortion of the recorded sound signals, up to the complete loss of the possibility of their detection due to the penetration of the measuring microphone into the wind shadow, the appearance of which is caused by wind refraction. Therefore the effects of wind affecting on sound propagation is an important problem, which requires the development of both theoretical and experimental methods, the use of which will allow us to correctly take into account the influence of wind exposure on the results of acoustic measurements in open areas. This paper presents the results of applying the maximum length sequence (MLS experiment) method to the problem of sound propagation in the presence of unsteady wind gusts. A simple model of sound propagation in the presence of wind gusts proposed based on the analysis of experimental data. This model can be used to assess the wind situation during acoustic measurements in an open area.

Keywords: MLS (Maximum Length Sequence) -experiment, wind refraction.

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39524

РАССЕЯНИЕ ЗВУКА НА ВЫТЯНУТОЙ МНОГОСЛОЙНОЙ ОБОЛОЧКЕ ВРАЩЕНИЯ

А.В. Клячкин

ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

Аннотация: в работе исследуется рассеяние плоской звуковой волны на вытянутой многослойной оболочке вращения, находящейся во внешнем водном пространстве. Вытянутая оболочка состоит из трех областей: внешней тонкой упругой замкнутой оболочки вращения, внутренней абсолютно жесткой замкнутой поверхности вращения и водного слоя между ними. Формы внутренней жесткой и внешней тонкой оболочки могут быть различны. На основе применения асимптотического метода (использующего вытянутость оболочки) и импедансного подхода (использующего решения для каждой области и их последующую «сшивку» в силу непрерывности граничных условий по давлению/напряжению и нормальным скоростям) удалось получить аналитическое выражение для диаграммы рассеяния в дальнем поле. В работе выполнены численные расчеты эквивалентного радиуса для двух типов рассеивателей: жесткой вытянутой оболочки вращения неаналитической формы; конструкции, состоящей из двух соосных оболочек вращения (внутренней – жесткой, внешней – тонкой упругой оболочкой), разделенных водной средой.

Ключевые слова: оболочка, диаграмма рассеяния, импеданс, эквивалентный радиус.

SOUND SCATTERING ON THE PROLATE MULTILAYERED ROTATIONAL SHELL

A.V. Klyachkin, Cand.Sc.

«Krylov State Research Centre», Saint-Petersburg, Russia

Abstract: the plane sound wave scattering on the prolate multilayered rotational shell positioned in the outer water space is investigated in the paper. The prolate shell consists from three regions: the outer thin elastic closed rotational shell, the inner absolutely hard closed rotational surface and water layer between it. The forms of the inner hard surface and the outer thin shell may be different. Based on the using both of asymptotic analysis (due to the elongation of shell) and impedance approach (obtaining the solutions in every region and their subsequent matching due to the continuous boundary conditions on the pressure/stresses and normal velocities) the analytical expression for scattering diagram in the far-field is found in the paper. The numerical calculations of the equivalent radius are performed for the two types of scatterer: hard prolate rotational shell

with non-analytic form; construction which consists from two coaxial rotational shells (inner – hard shell, outer – thin elastic shell) separated by water media.

Keywords: shell, scattering diagram, impedance, equivalent radius.

Введение

Вопросам рассеяния звука на различного рода объектах, находящихся в водной среде, посвящено (в силу практической актуальности) большое количество работ. Современное состояние данной проблематики отражено в монографиях [1,2]. Исторически внимание уделялось в основном изучению влияния формы объекта на характеристики рассеяния звука. Однако в настоящее время не меньший интерес вызывает влияние внутренней структуры объекта на процесс рассеяния звука (в частности, в целях классификации объекта). Поэтому рассмотрим падение плоской звуковой волны на четырехслойную среду, состоящую из внешнего и внутреннего водоподобных пространств, разделенных упругой вытянутой тонкой оболочкой вращения неаналитической формы. Внутреннее водоподобное пространство ограничено снаружи тонкой упругой оболочкой, а изнутри - абсолютно жесткой вытянутой поверхностью вращения неаналитической формы (вообще говоря, отличной от формы тонкой оболочки). Падающая снаружи из внешнего пространства на тонкую оболочку плоская звуковая волна (после многократных отражений во внутреннем водоподобном пространстве) дает в результате во внешнем пространстве вторичное рассеянное гидроакустическое поле. Распространение волн внутри упругой оболочки подчиняется уравнениям теории упругости, а во внутреннем и внешнем водоподобных пространствах подчиняется волновым уравнениям. Будем ниже рассматривать установившиеся во времени процессы, зависимость от времени, пропорциональная множителю *exp(-iωt)*, ниже опускается. Тогда волновые уравнения превращаются в уравнения Гельмгольца для Фурье-гармоник акустических полей давления в частотной области, имеющие вид во внутреннем и внешнем водоподобных пространствах:

$$\left(\Delta + k_{out}^2\right) P_{out}\left(x, y, z, \omega\right) = 0\,, \tag{1}$$

$$\left(\Delta + k_{inn}^2\right) P_{inn}\ \left(x, y, z, \omega\right) = 0\,, \tag{2}$$

здесь ω – частота, c_{out} и c_{inn} – скорости звука во внешнем и внутреннем водоподобных пространствах, $k_{out} = \omega / c_{out}$ и $k_{inn} = \omega / c_{inn}$ – волновые числа во внешнем и внутреннем пространствах, $\Delta = \partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial y^2 + \partial^2 / \partial z^2$ – лапласиан. Уравнение упругих колебаний оболочки имеет вид [3]:

$$c_t^2 \Delta \vec{U} + \left(c_l^2 - c_t^2\right) \nabla div \vec{U} + \omega^2 \vec{U} = 0\,, \tag{3}$$

здесь $\vec{U}$ – вектор смещений, c_l, c_t – соответственно продольная и поперечная скорости волн в упругой оболочке, которые наряду с ее плотностью ρ определяют ее свойства. В общем случае продольная и поперечная скорости волн являются (за счет потерь) комплексными величинами, зависящими от частоты ω, и могут быть выражены [3] через модуль Юнга (E) и коэффициент Пуассона (σ) или через коэффициенты Ламэ (λ, μ – модуль сдвига) в виде:

$$c_l = \sqrt{\frac{E(1-\sigma)}{\rho(1+\sigma)(1-2\sigma)}} = \sqrt{\frac{\lambda+2\mu}{\rho}}, \qquad c_t = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\sigma)}} = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}. \tag{4}$$

Замыкают математическую постановку задачи граничные условия, которые требуют непрерывности нормальных скоростей и нормальных компонент напряжений и давлений и равенства нулю тангенциальных напряжений на границах упругой оболочки с внутренним и внешним водоподобными пространствами, а также на границе жесткой внутренней поверхности и внутреннего водоподобного пространства.

Основные результаты

Выражение для падающей (на вытянутую вдоль оси OZ многослойную оболочку вращения) звуковой волны имеет вид:

$$P_f(x,y,z,\omega) = \exp[ik_{out}(x\sin\theta_f\cos\phi_f + y\sin\theta_f\sin\phi_f + z\cos\theta_f)]. \tag{5}$$

Выражение для акустического поля во внешнем пространстве – сумма падающей звуковой волны и рассеянного вторичного поля:

$$P_{out}(x,y,z,\omega) = \exp[ik_{out}(x\sin\theta_f\cos\phi_f + y\sin\theta_f\sin\phi_f + z\cos\theta_f)] + P_{scat}(x,y,z,\omega), \tag{6}$$

здесь θ_f, ϕ_f – углы падения волны. Неаналитические формы упругой тонкой оболочки и внутренней жесткой поверхности в цилиндрической системе координат могут быть заданы в виде: $r_{inn}(z) = af_{inn}(z)$, $0 \le f_{inn}(z) \le 1$ при $z \in [-l_{inn}, l_{inn}]$; $r_{out}(z) = bf_{out}(z)$, $0 \le f_{out}(z) \le 1$ при $z \in [-l_{out}, l_{out}]$ (центр внешней оболочки находится в начале системы координат).

Выражение для рассеянного вторичного акустического поля в дальней зоне в сферической системе координат в точке наблюдения с координатами (R,θ,φ) имеет вид:

$$P_{scat}(R,\theta,\varphi,\theta_f,\phi_f,\omega) \approx \exp[ik_{out}R]\cdot(k_{out}R)^{-1}\cdot f_{scat}(\theta,\varphi,\theta_f,\phi_f), \tag{7}$$

здесь $f_{scat}(\theta,\varphi,\theta_f,\phi_f)$ – бистатическая диаграмма рассеяния вторичного поля.

Используя условие вытянутости внешней оболочки и внутренней твердой поверхности ($k_{out}l_{out} \gg 1$, $k_{inn}l_{inn} \gg 1$) и предполагая определенную гладкость их форм, можно использовать асимптотический анализ, разработанный в [4,5]. В результате объединения подобного анализа и импедансного подхода в согласовании скоростей и давлений на границах внутренней твердой поверхности и тонкой упругой оболочки для бистатической

диаграммы рассеяния вторичного поля удалось получить выражение:

$$f_{scat}\left(\theta,\varphi,\theta_f,\varphi_f\right)=\frac{ik_{out}}{\pi}\cdot\sum_{m=-\infty}^{\infty}Exp\left[im\left(\varphi-\varphi_f\right)\right]\cdot\int_{-l_{out}}^{l_{out}}dzExp\left[ik_{out}z\left(Cos\theta_f-Cos\theta\right)\right]\cdot$$
$$\cdot\frac{J_m\left(k_{out}r_{out}(z)Sin\theta\right)}{J_m\left(k_{out}r_{out}(z)Sin\theta_f\right)}\cdot\frac{J'_m\left(k_{out}r_{out}(z)Sin\theta_f\right)}{H_m^{(1)\prime}\left(k_{out}r_{out}(z)Sin\theta_f\right)}\cdot F_m^{imp}(Z_m^{mech},Z_m^{out},Z_m^{inn},Z_m^{wat}) \quad . \tag{8}$$

В выражении (8) $J_m\left(k_{out}r_{out}(z)Sin\theta\right)$ – функция Бесселя m порядка, $H_m^{(1)\prime}\left(k_{out}r_{out}(z)Sin\theta_f\right)$ – производная от функции Ханкеля 1 рода m порядка (производная берется по всему аргументу), $F_m^{imp}(Z_m^{mech},Z_m^{out},Z_m^{inn},Z_m^{wat})$ – импедансная функция, однозначно определяющаяся последовательностью и физическими свойствами оболочек и пространств:

$$F_m^{imp}(Z_m^{mech},Z_m^{out},Z_m^{inn},Z_m^{wat})=\frac{Z_m^{wat}-Z_m^{inn}+Z_m^{mech}}{Z_m^{wat}+Z_m^{out}+Z_m^{mech}}. \tag{9}$$

Входящие в аргументы импедансной функции и в правую часть выражения (9) величины – не что иное, как соответствующие импедансы. Например:

$$Z_m^{out}=\frac{i\rho_{out}c_{out}}{Sin\theta_f}\frac{H_m^{(1)}\left(k_{out}r_{out}(z)Sin\theta_f\right)}{H_m^{(1)\prime}\left(k_{out}r_{out}(z)Sin\theta_f\right)},\qquad Z_m^{inn}=-\frac{i\rho_{inn}c_{inn}}{Sin\theta_f}\frac{J_m^{(1)}\left(k_{inn}r_{inn}(z)Sin\theta_f\right)}{J_m^{(1)\prime}\left(k_{inn}r_{inn}(z)Sin\theta_f\right)}. \tag{10}$$

Это импедансы внешнего и внутреннего по отношению к тонкой упругой оболочке пространства. Выражения для импеданса водного слоя (Z_m^{wat}) между внешней и внутренней оболочками, а также для механического импеданса (Z_m^{mech}) внешней тонкой упругой оболочки в силу их громоздкости в явном виде не приводим; укажем, что параметрическая зависимость от координаты z (т.е. учет неаналитичности формы через $r_{out}(z)$ и $r_{inn}(z)$) сохраняется. В случае отсутствия внешней тонкой упругой оболочки импедансная функция равна единице. Для вычисления эквивалентного радиуса многослойной оболочки необходимо перейти к моностатике [6]:

$$R_{eq}=2\cdot\left(k_{out}\right)^{-1}\left|\,f_{scat}^{loc}\left(\theta_f,\varphi_f\right)\right|. \tag{11}$$

В выражении (11) $f_{scat}^{loc}\left(\theta_f,\varphi_f\right)$ – диаграмма рассеяния вторичного поля в локационном направлении, т.е. когда приемник и излучатель совпадают в пространстве. Это происходит при углах $\theta=\pi-\theta_f$, $\varphi=\pi+\varphi_f$. Тогда из (8,11) получаем выражение для эквивалентного радиуса в виде:

$$R_{eq}\left(\theta_f,\varphi_f\right)=\frac{2}{\pi}\left|\sum_{m=-\infty}^{\infty}(-1)^m\int_{-l_{out}}^{l_{out}}dzExp\left[i2k_{out}zCos\theta_f\right]\cdot\right.$$
$$\left.\frac{J'_m\left(k_{out}r_{out}(z)Sin\theta_f\right)}{H_m^{(1)\prime}\left(k_{out}r_{out}(z)Sin\theta_f\right)}\cdot F_m^{imp}(Z_m^{mech},Z_m^{out},Z_m^{inn},Z_m^{wat})\right| \tag{12}$$

В качестве примера численного расчета были выбраны две модели. Первая модель, для которой был выполнен расчет эквивалентного радиуса, представляла собой две соосно расположенных оболочки, разделенные водным слоем. Внутренняя оболочка представляла собой жесткий цилиндр (длина L =20 м, радиус a=1 м) с двумя полусферическими заглушками на концах, а внешняя тонкая (H=8 мм) упругая стальная оболочка представляла цилиндр той же длины, но с большим радиусом (L=20 м, b=1.2 м), также с двумя полусферическими упругими заглушками на концах. Вторая модель (достаточно часто используемая [1,2]), представляла собой жесткий цилиндр (L=20 м, a=1 м) тех же размеров с двумя жесткими полусферическими заглушками на концах – т.е. упругая стальная тонкая оболочка отсутствовала. Результаты расчетов зависимости эквивалентного радиуса (нормированного на длину цилиндра) от угла падения волны (частота 1000 Гц) для двух моделей показаны на рис. 1 (цифры 1, 2 – номер модели).

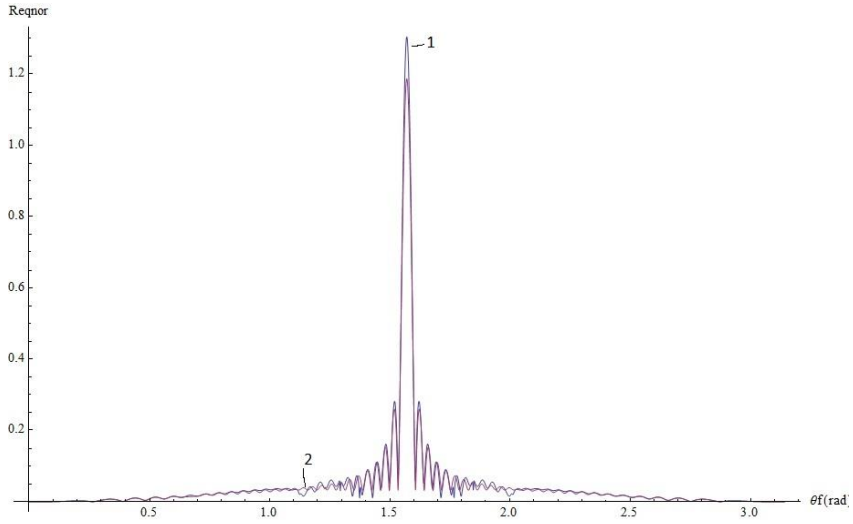


Рис. 1 – Зависимость эквивалентного радиуса (нормированного на длину цилиндра) от угла падения (1 – модель с упругой тонкой стальной оболочкой (синий цвет), 2 – модель без упругой тонкой стальной оболочки (красный цвет)).

Из графиков на рис. 1 видно, что для частоты звуковой волны 1000 Гц наличие упругой тонкой оболочки (и водного слоя между упругой и жесткой оболочками) не приводит к существенному росту эквивалентного радиуса в зависимости от угла падения. Максимальный рост происходит на траверзе и составляет не более 15%. Однако картина рассеяния резко меняется, если меняется частота падающей волны – через импедансную функцию $F_m^{imp}(Z_m^{mech}, Z_m^{out}, Z_m^{inn}, Z_m^{wat})$ начинают влиять на эквивалентный радиус резонансные свойства тонкой упругой оболочки и водного слоя между оболочками. Поэтому были выполнены расчеты зависимости эквивалентного радиуса от частоты для двух моделей при траверзном падении звуковой волны. Результаты выполненных для двух моделей расчетов зависимости эквивалентного радиуса (нормированного на длину цилиндра) от волнового размера жесткого цилиндра показаны на рис. 2 (цифры 1, 2 – номер модели). Расчеты

производились для нормально ($\theta_f = \pi/2$) падающей (траверзное направление) звуковой волны.

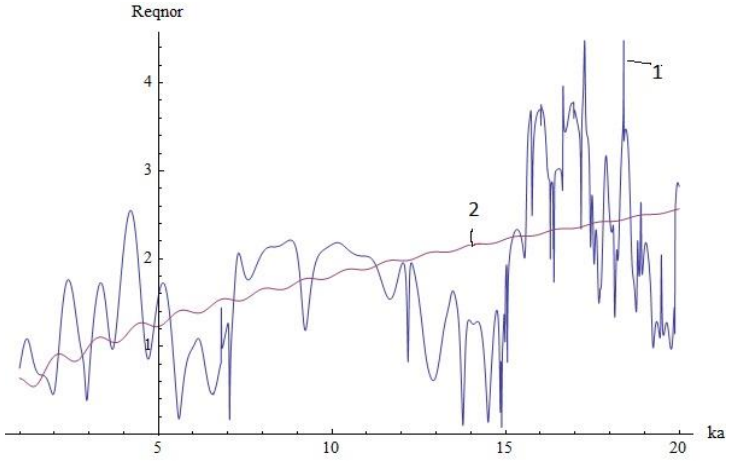


Рис. 2. Зависимость эквивалентного радиуса (нормированного на длину цилиндра) от волнового размера жесткого цилиндра (1 – модель с упругой тонкой стальной оболочкой (синий), 2 – модель без упругой тонкой стальной оболочки (красный))

Из графиков на рис. 2 видно, что наличие упругой тонкой оболочки (и водного слоя между упругой и жесткой оболочками) при используемых в модели параметрах приводит как к существенному падению, так и к росту эквивалентного радиуса на траверзе для определенных частотных областей.

Заключение

В результате выполненного исследования рассеяния плоской звуковой волны на вытянутой многослойной оболочке вращения на основе использования асимптотического анализа и импедансного подхода было получено аналитическое выражение для бистатической диаграммы рассеяния. Выполненные численные расчеты эквивалентного радиуса рассеяния показали, как значительное падение, так и рост эквивалентного радиуса на траверзе для определенных частотных областей.

Список литературы

1. *Клещев А.А.* Гидроакустические рассеиватели. Санкт-Петербург. Издательство СПбГМТУ.2012, 268с.

2. *Ильменков С.Л.* Развитие методов решения граничных задач гидроакустики. Санкт-Петербург. Издательство СПбГМТУ.2020, 190с.

3. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теория упругости. Москва. Издательство «Наука». 1987, 248с.

4. *Федорюк М.В.* Дифракция плоской волны на вытянутом теле вращения. //ДАН СССР. 1983, т.272, №3, с.587.

5. *Федорюк М.В.* Рассеяние плоской волны на цилиндрической поверхности с длинным возмущением. Изв. АН СССР. Сер. матем. 1985, т.49, №3, с.160.

6. *Шендеров Е.Л.* Излучение и рассеяние звука. Ленинград. Издательство «Судостроение». 1989, 304с.

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39525

АСИМПТОТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ТРЕХМЕРНЫХ ИНТЕГРАЛОВ С ОСОБЕННОСТЯМИ В ПРИМЕНЕНИИ К ДИФРАКЦИОННОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ ВБЛИЗИ ГОФРИРОВАННОГО ЭКРАНА

Лаптев А.Ю.[1)], Шанин А.В.[1)]

[1)]МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва

Тел.: +7(916)814-9723; E-mail: laptev97@bk.ru

В [1] был разработан метод асимптотической оценки трехмерных интегралов типа Фурье, в экспоненте которых стоит произведение некоторой фазовой функции и большого параметра. Вклад в асимптотику дают такие особые точки, как точки стационарной фазы в пространстве, на сингулярности и на пересечении сингулярностей, точки тройного пересечения сингулярностей и конические точки сингулярностей. Для всех этих типов особых точек возможно построить топологические условия существования ненулевых асимптотик (условия видимости) и получить старшие члены соответствующих асимптотик. С помощью данного метода решается задача о дифракционном излучении источника, движущегося вблизи гофрированного экрана синусоидальной формы. Выявляются два типа волн, соответствующих локальным особым точкам интеграла. Первый тип связан с тем, что при движении вдоль гофрированной поверхности источник обретает собственную частоту, которая затем меняется из-за эффекта Доплера. Второй тип соответствует брэгговскому рассеянию на поверхности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда 25-22-00106, https://rscf.ru/project/25-22-00106/.

Список литературы:

1. *Шанин А.В., Лаптев А.Ю. //* Акуст. журн. Т. 71 № 4 С. 504—520

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39526

РАЗЛОЖЕНИЯ ВОЛНОВЫХ ПОЛЕЙ ПО ПЛОСКИМ ВОЛНАМ

Шанин А.В.[1)]

[1)]*МГУ им. М.В. Ломоносова, Физический факультет, Москва.*

Тел.: +7(495)939-30-81; E-mail: andrey_shanin@mail.ru

Поиск решения задачи распространения или рассеяния волн в виде разложения (интеграла) по плоским волнам является хорошо известным приемом. Начало использование этого приема было положено А.Зоммерфельдом при решении задачи о дифракции волн на идеальной полуплоскости. Полученные представления носят названия интегралов Зоммерфельда и имеют достаточно непростую структуру.

В докладе представлены результаты построения разложений полей по плоским волнам в достаточно экзотических случаях: для волноводов произвольного типа, для уравнения Лапласа-Бельтрами на сфере, для дискретного аналога уравнения Гельмгольца на сетке и для полей в трехмерном случае.

Сформулированы основные принципы построения разложений по плоским волнам:

- Интегрирование производится непосредственно на дисперсионной диаграмме, которая является аналитическим многообразием.
- Для описания поля строится система скользящих контуров, удовлетворяющая определенным условиям. Разные системы контуров используются для построения функций Грина и для решения задач рассеяния.
- Контура интегрирования раскладываются в суммы контуров наискорейшего спуска для асимптотического оценивания и проверки выполнения условий излучения. Для этого используются «двойственные наперстки Лефшеца».

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда 25-22-00106, https://rscf.ru/project/25-22-00106/.

[1] *Shanin A.V., Korolkov A.I., Kniazeva K.S.* Saddle point method for transient processes in waveguides // *Journal of Theoretical and Computational Acoustics*. 30, 4, 2150018 (2022).

[2] *Shanin A.V., Korolkov A.I.* Sommerfeld-type integrals for discrete diffraction problems // *Wave Motion*. 97, 102606 (2020).

Ключевые слова: дифракция акустических волн, задача Зоммерфельда

PLANE WAVE REPRESENTATION OF WAVE FIELDS

A. V. SHANIN[1)]

[1)]*M.V.Lomonosov Moscow State University, Moscow*

Tel.: +7(495)939-30-81; E-mail: andrey_shanin@mail.ru

A well-known method to solve a diffraction or a propagation problem is to represent a solution as an integral over plane waves. This method has been proposed by A.Sommerfeld for solving the problem of wave diffraction by an ideal half-plane. The resulting integrals are referred to as the Sommerfeld integrals. They have a rather complicated structure.

The talk presents some results of building plane wave representations in rather exotic cases: for a waveguides of an arbitrary type, for the Laplace-Beltrami equation on a sphere, for a discrete analog of the Helmholtz equation on a lattice, and for the three-dimensional continuous case.

Some basic principles of building plane wave representations are formulated:

- The integration is held over the dispersion diagram, which is considered as a complex manifold.
- A family of sliding contours is built for description of the field. Some conditions are formulated for these families. Different families are built for Green's functions and for scattering problems.
- The integration contours are decomposed into sums of steepest descend contours. A technique of "dual Lefschetz' thimbles" is used for this.

The research was supported by Russian Science Foundation grant No. 25-22-00106, https://rscf.ru/project/25-22-00106/.

[3] *Shanin A.V., Korolkov A.I., Kniazeva K.S.* Saddle point method for transient processes in waveguides // *Journal of Theoretical and Computational Acoustics*. 30, 4, 2150018 (2022).

[4] *Shanin A.V., Korolkov A.I.* Sommerfeld-type integrals for discrete diffraction problems // *Wave Motion*. 97, 102606 (2020).

Keywords: Diffraction of acoustic waves, Sommerfeld problem

УДК: 534.21 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39527

Плотность акустических состояний и эффекты когерентного излучения звука

М. И. Петров[1], М.В. Смагин[1], Д.А. Климов[1]

[1] *Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, Кронверкский проспект 49;*

E-mail: m.petrov@metalab.ifmo.ru

Ключевые слова: акустические резонаторы, плотность состояний, радиационный импеданс, взаимный импеданс

Понятие плотности состояний является фундаментальным в квантовой оптике и электродинамике и широко используется для описания излучательных свойств среды и взаимодействия источников с окружением [1]. В последние годы аналогичный формализм развивается и в акустике, где вводится локальная плотность акустических состояний (local density of states, LDOS), определяемая через мнимую часть акустической функции Грина и используемая для описания акустического аналога эффекта Пёрселла и модификации излучения источников звука [2,3].

В настоящей работе предложено расширение данного подхода за счёт введения перекрёстной плотности состояний (cross density of states, CDOS) и акустического аналога резонансного переноса энергии типа Фёрстера (FRET), включая перенос между монопольными и дипольными акустическими излучателями. Показано, что LDOS и CDOS естественным образом выражаются через радиационный и взаимный акустические импедансы.

Экспериментально реализован метод извлечения этих величин на основе анализа комплексного входного импеданса громкоговорителя. Проведены измерения в свободном пространстве и в импедансной трубе с изменяемыми граничными условиями. Обнаружены резонансные особенности, соответствующие акустическим модам среды, а также интерференционные эффекты, связанные с когерентным излучением. Полученные результаты демонстрируют возможность экспериментального доступа к LDOS и создают основу для дальнейших измерений CDOS и акустического FRET.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-79-31027.

Список литературы

1. E. M. Purcell, H. C. Torrey, R. V. Pound. Spontaneous Emission Probabilities at Radio Frequencies. // Phys. Rev. 1946. 69, № 11-12. P. 681.

2. L. Langguth, R. Fleury, A. Alù, A. F. Koenderink. Drexhage's Experiment for Sound. // Phys. Rev. Lett. 2016. 116, № 22. P. 224301.
3. M. Landi, J. Zhao, W. E. Prather, Y. Wu, L. Zhang. Acoustic Purcell Effect for Enhanced Emission. // Phys. Rev. Lett. 2018. 120, № 11. P. 114301.

Acoustic density of states and coherent sound radiation effects

M. Petrov[1], M. Smagin[1], D. Klimov[1]

[1] ITMO University, Kronverksky Pr. 49, bldg. A, St. Petersburg, 197101, Russia

E-mail: m.petrov@metalab.ifmo.ru

Keywords: acoustic resonators, density of states, radiation impedance, mutual impedance

The concept of density of states is fundamental in quantum optics and electrodynamics and is widely used to describe the radiative properties of media and the interaction of sources with their environment [1]. In recent years, an analogous formalism has been developed in acoustics, where the local density of acoustic states (LDOS) is introduced via the imaginary part of the acoustic Green's function and is used to describe the acoustic analogue of the Purcell effect and the modification of sound source radiation [2,3].

In the present work, we propose an extension of this approach by introducing the cross density of states (CDOS) and the acoustic analogue of Förster resonance energy transfer (FRET), including transfer between monopolar and dipolar acoustic emitters. It is shown that LDOS and CDOS are naturally expressed in terms of the radiation and mutual acoustic impedances.

An experimental method for retrieving these quantities based on the analysis of the complex input impedance of a loudspeaker is implemented. Measurements are conducted in free space and in an impedance tube with variable boundary conditions. Resonant features corresponding to the acoustic modes of the environment are observed, as well as interference effects associated with coherent radiation. The obtained results demonstrate the feasibility of experimental access to the LDOS and lay the groundwork for further measurements of CDOS and acoustic FRET.

This work was performed with financial support of the Russian Science Foundation (Project No. 25-79-31027).

Bibliography

1. E. M. Purcell, H. C. Torrey, R. V. Pound. Spontaneous Emission Probabilities at Radio Frequencies. // Phys. Rev. 1946. 69, № 11-12. P. 681.
2. L. Langguth, R. Fleury, A. Alù, A. F. Koenderink. Drexhage's Experiment for Sound. // Phys. Rev. Lett. 2016. 116, № 22. P. 224301.
3. M. Landi, J. Zhao, W. E. Prather, Y. Wu, L. Zhang. Acoustic Purcell Effect for Enhanced Emission. // Phys. Rev. Lett. 2018. 120, № 11. P. 114301.

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39528

Аналитическая T-матрица открытого резонатора Гельмгольца

Медведева П.А.[1)], Максимов Д.Н.[2)], Глазко Л.А.[1)], Проскурин А.А.[1)], Ли Юн [3)], Петров М.И.[1)], Богданов А.А.[1), 4)]

[1)] Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, Россия;

[2)] Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, г. Красноярск, Россия;

[3)] Университет Тунцзи, г. Шанхай, Китай;

[4)] Харбинский инженерный университет, г. Циндао, Китай.

Тел.: +7 (921) 845-00-57;

E-mail: polina.medvedeva@metalab.ifmo.ru

Резонаторы Гельмгольца являются основными строительными блоками акустических метаматериалов и метаповерхностей, обеспечивают сильную локализацию волн, улучшенное рассеяние и индивидуальное звукопоглощение. Несмотря на их широкое использование и разнообразие областей применения, общее аналитическое описание резонаторов Гельмгольца с открытой геометрией все еще отсутствует. Одним из подходов к устранению этого пробела является адаптация аналитических методов, разработанных для открытых квантовых систем, таких как открытый квантовый бильярд.

Мы разработали аналитическую замкнутую модель акустической T-матрицы открытого резонатора Гельмгольца, используя формализм функции Грина и разложения поля внутри резонатора Гельмгольца по базису закрытого резонатора. Метод, первоначально предложенный для хаотического квантового бильярда и обеспечивающий согласование мод на апертуре, может быть естественным образом распространен на классические акустические задачи. Полученный в результате формализм устанавливает явную связь между геометрией резонатора и спектрами рассеяния, обеспечивая прямой доступ как к характеристикам рассеяния, так и к комплексным собственным значениям открытых резонансных мод. Аналитическая T-матрица обеспечивает эффективное мультипольное разложение рассеянного поля и устраняет необходимость в чисто численном нахождении собственных значений.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №25-79-31027, https://rscf.ru/project/25-79-31027/.

Ключевые слова: открытый резонатор Гельмгольца, матрица рассеяния, открытый квантовый бильярд

ANALYTICAL T-MATRIX FOR OPEN HELMHOLTZ RESONATORS

Polina Medvedeva[1], Dmitrii Maksimov[2], Lana Glazko[1], Alexey Proskurin[1], Yong Li[3], Mihail Petrov[1], Andrey Bogdanov[1,4]

[1]ITMO University, Saint Petersburg, Russia

[2]Kirensky Institute of Physics, Krasnoyarsk, Russia

[3] Tongji University, Shanghai, China

[4] Harbin Engineering University, Qingdao, China

polina.a.medvedeva@gmail.com

Helmholtz resonators are fundamental building blocks of acoustic metamaterials and metasurfaces, enabling strong wave confinement, enhanced scattering, and tailored sound absorption. Despite their widespread use and diverse applications, a general analytical description of Helmholtz resonators with open geometries is still lacking. One approach to addressing this gap is to adapt analytical methods developed for open quantum systems, such as open quantum billiards. In this work, we develop a closed-form analytical model for the acoustic T-matrix of an open Helmholtz resonator based on field continuity across a finite angular aperture. Originally proposed for chaotic quantum billiards as a mode-matching technique at an opening, this method can be naturally extended to classical acoustic problems. The resulting formalism establishes an explicit connection between resonator geometry and scattering spectra, providing direct access to both scattering characteristics and the complex eigenfrequencies of open resonant modes. The analytical T-matrix enables an efficient multipole expansion of the scattered field and eliminates the need for purely numerical mode-solving procedures. Consequently, the evolution of resonances with geometrical parameters, such as cavity size and aperture shape, can be systematically analyzed.

The work is funded by Russian Science Foundation grant № 25-79-31027, https://rscf.ru/project/25-79-31027/

Keywords: open Helmholtz resonator, scattering matrix, open quantum billiards

УДК: 534.213 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39529

Перестраиваемый резонатор Гельмгольца с магнитоуправляемой гибкой стенкой

М.В. Кузьмин[1,a], А.А. Цыбуля[1,2b], Д.В. Кладько[1,c], М.И. Петров[1,d]

[1] *Физический факультет, Университет ИТМО. Кронверкский пр., д. 49, лит. А, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация*

[2] *School of Engineering, New Uzbekistan University. Ул. Мустакиллик, д. 54, Ташкент, 100008, Узбекистан*

E-mail: [a]mvkuzmin@itmo.ru, [b]a.tsibulya@newuu.uz, [c]dkladko@itmo.ru, [d]mishapetrov@itmo.ru

Аннотация: В настоящее время одной из актуальных задач акустики и физики волновых процессов является создание активных перестраиваемых акустических структур, позволяющих управлять параметрами акустических волн. Подобные возможности востребованы при разработке акустических метаповерхностей, отражательных решеток, перестраиваемых звукопоглощающих панелей и т.д. Реализация таких устройств требует разработки элементарных ячеек (метаатомов), обладающих широкими возможностями настройки резонансных характеристик.

В данной работе рассматривается перестраиваемый резонатор Гельмгольца с магнитоуправляемой гибкой стенкой, обеспечивающий динамическую настройку резонансной частоты за счет изменения эффективного объема резонатора. Гибкая стенка выполнена в виде композитного материала из силиконового эластомера с включением магнитных микрочастиц NdFeB, способного изменять свое положение под воздействием внешнего магнитного поля. Деформация гибкой стенки приводит к изменению геометрических параметров резонатора и, как следствие, к смещению резонансной частоты.

Проведены первичные численные расчеты и экспериментальные исследования, демонстрирующие возможность управляемой и обратимой перестройки резонансной частоты резонатора в реальном времени за счет изменения его геометрии. Полученные результаты подтверждают эффективность предложенного подхода для активного управления акустическими свойствами резонансных систем.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-79-31027.

Ключевые слова: перестраиваемый резонатор, магнитоуправляемый резонатор, резонатор Гельмгольца.

Tunable helmholtz resonator with a magnetically controlled flexible wall

M. V. Kuzmin[1,a], A.A. Tsibulya[1,2,b], D.V. Kladko[1,c], M.I. Petrov[1,d]

[1] *School of Physics and Engineering, ITMO University. St. Petersburg, 197101, Russia*

[2] *School of Engineering, New Uzbekistan University. Tashkent, 100008, Uzbekistan*

E-mail: [a]*mvkuzmin@itmo.ru*, [b]*a.tsibulya@newuu.uz*, [c]*dkladko@itmo.ru*, [d]*mishapetrov@itmo.ru*

Abstract: One of the current challenges in acoustics and the wave physics is the development of active tunable acoustic structures which allow the control of acoustic wave parameters. Such capabilities are in demand in the design of acoustic metasurfaces, reflective arrays, tunable sound-absorbing panels, etc. The implementation of such devices requires the development of elementary cells (meta-atoms) with a broad range of options for tuning their resonant characteristics.

This paper considers a tunable Helmholtz resonator with a magnetically controlled flexible wall, which enables dynamic tuning of the resonant frequency by changing the effective volume of the resonator. The flexible wall is made of a composite material consisting of a silicone elastomer with embedded NdFeB magnetic microparticles, capable of changing its position under the influence of an external magnetic field. Deformation of the flexible wall leads to a change in the resonator's geometric parameters and, consequently, to a shift in the resonant frequency.

Preliminary numerical calculations and experimental studies have been carried out, demonstrating the possibility of controlled and reversible real-time tuning of the resonator's resonant frequency by changing its geometry. The results obtained confirm the effectiveness of the proposed approach for the active control of the acoustic properties of resonant systems.

This work is funded by the Russian Science Foundation grant № 25-79-31027.

Keywords: tunable resonator, magnetically controlled resonator, Helmholtz resonator.

PACS: 43.20.El

УДК: 534.21 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39530

РЕЗОНАНСНЫЙ ТУННЕЛЬНЫЙ ЭФФЕКТ В АКУСТИЧЕСКОМ ВОЛНОВОДЕ

Миролюбов М.А.[1,a], Петров М.И.[1,b], Богданов А.А.[1,2,c]
[1] *Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, Россия;*
[2] *Харбинский инженерный университет, г. Циндао, Китай.*
Тел.: +7 921 445 0120;
E-mail: [a]*mark.mirolyubov@metalab.ifmo.ru*, [b]mishapetrov@itmo.ru,
[c]~~a.bogdanov@metalab.ifmo.ru~~

Эффект резонансного туннелирования широко известен в различных областях физики, таких как квантовая механика, физика твердого тела, оптика. Схожесть волновых уравнений позволяет демонстрировать аналогичные явления в акустике.

Для демонстрации резонансного туннельного эффекта использовался акустический волновод круглого сечения с двумя последовательными утоньшениями. В волноводе рассматривалась первая антисимметричная мода (мода с азимутальным числом 1). Параметры системы были подобраны таким образом, чтобы на рассматриваемой частоте антисимметричная мода волновода была распространяющейся, но соответствующее решение в тонких сегментах волновода было эванесцентным. Это приводит к формированию туннельного эффекта через тонкие участки. При этом настройка расстояния между тонкими участками волновода позволяло контролировать резонансные условия туннелирования в системе.

Для численного расчета распространения звука в рассматриваемой системе был реализован метод мультимодового разложения падающего и рассеянного полей в точках сужения и расширения волновода. С помощью сшивания граничных условий были построены расширенные матрицы рассеяния (учитывающие эванесцентные моды) для каждого участка волновода. Композиция матриц рассеяния позволила получить спектры прохождения и отражения для первой антисимметричной моды и, в результате, продемонстрировать резонансный туннельный эффект.
Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №25-79-31027.

Ключевые слова: туннельный эффект, согласование мод

RESONANCE TUNNEL EFFECT IN THE ACOUSTIC WAVEGUIDE

Miroliubov M.A.[1,a], Petrov M.I.[1,b], Bogdanov A.A.[1,2,c]
[1] *School of Physics and Engineering, ITMO University, St. Petersburg, 197101, Russia.*
[2] *Qingdao Innovation and Development Center, Harbin Engineering University, Qingdao, Shandong, 266000 China.*
Тел.: +7 921 445 0120;
E-mail: [a]*mark.mirolyubov@metalab.ifmo.ru*, [b]mishapetrov@itmo.ru, [c]a.bogdanov@metalab.ifmo.ru

The resonant tunneling effect is widely known in various fields of physics, such as quantum mechanics, solid-state physics, and optics. The similarity of wave equations makes it possible to demonstrate analogous to different phenomena in acoustics.

To demonstrate the resonant tunneling effect, a circular cross-section acoustic waveguide with two sequential narrowings was used. The first antisymmetric mode (the mode with radial and azimuthal numbers equal to 1) was considered in the waveguide. The system parameters were chosen so that at the frequency of interest, the antisymmetric mode was propagating in the waveguide, but the corresponding solution in the narrow segments was evanescent. This leads to the formation of a tunneling effect through the narrow sections. Moreover, adjusting the distance between the narrow sections of the waveguide made it possible to control the resonant tunneling conditions in the system.

For the numerical calculation of sound propagation in the system, a multimodal decomposition method was implemented for the incident and scattered fields at the waveguide constrictions and expansions. By matching boundary conditions, extended scattering matrices (accounting for evanescent modes) were constructed for each section of the waveguide. The composition of the scattering matrices allowed obtaining the transmission and reflection spectra for the first antisymmetric mode and, as a result, demonstrating the resonant tunneling effect.

The work is funded by Russian Science Foundation grant № 25-79-31027.
Keywords: tunnel effect, mode coupling

PACS: 43.20.Fn

УДК 534 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39531

Исследование и моделирование физических процессов при распространении звукового импульса в волноводе с упругими стенками

Ф.Ф. Легуша[2,a)], Н.М. Лисенков[1,b)], Ю.Н. Попов [1,2,c)], В.Ю. Чижов[1,d)]
[1)] ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 196158, Санкт-Петербург, Московское шоссе,44
[2)]ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», e-mail: office@smtu.ru. Санкт-Петербург, Лоцманская ул., 3
E-mail: [a]legusha@smtu.ru, [b]krylov6@ksrc.ru, [c]2360460yk@gmail.com, [d]krylov6@ksrc.ru

Объектом исследований является волновод, представляющий собой цилиндрическую оболочку, заполненную водой. В статье рассматриваются физический процесс возбуждения звукового импульса от источника монопольного типа и его распространение при различных условиях на внутренней границе волновода. На численной модели выполнен анализ формирования фронта импульсного сигнала, поля местных затухающих волн, возникновения дисперсии и затухания при условии взаимодействия с упругими стенками волновода. Выполнен анализ влияния упругих стенок волновода при распространении звукового импульса. Результаты исследований показывают возможности численного моделирования сложных динамических процессов при решении прикладных задач, связанных с снижением шума и вибрации в волноводных системах.

Ключевые слова: звуковой импульс, цилиндрическая оболочка, акустический импеданс, конечноэлементная модель
PACS: 51.40.+p; 62.60.+v

1. Введение

Целью выполненных исследований являлось описание физических процессов излучения и распространение звуковой волны в протяженном волноводе, качественно описывающим реальную волноводную систему, с использованием методов численного моделирования. Для верификации результатов расчетов рассмотрена численная модель волновода с абсолютно жесткими стенками, для которой существует известное точное аналитическое решение описания акустического поля. В основной модели был реализован механизм взаимодействия акустического импульса с упругими стенками волновода, позволяющий выполнить оценки дисперсии и затухания в условиях, максимально приближенных к реальной конструкции. В качестве источника звукового сигнала рассматривался источник монопольного типа, расположенный в геометрическом центре волновода.

2. Аналитические методы расчета акустических полей в волноводе

В качестве исследуемой модели конструкции (рис.1) рассматривался волновод длиной круглого сечения (R - радиус, L_0 - длина волновода).

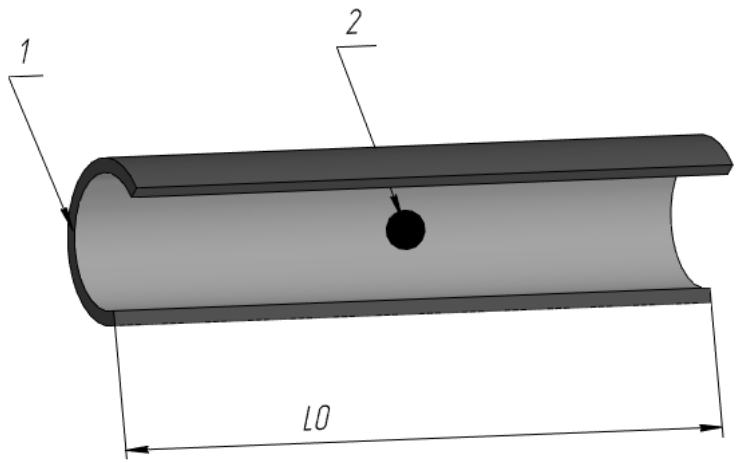


Рисунок 1 - Расчетная модель волновода: 1- упругая оболочка цилиндрического волновода; 2- источник монопольного типа.

Теоретическое описание физико-математической модели распространения тонального сигнала в круглом волноводе с абсолютно жесткими стенками подробно изложена в работе [1]. Отметим, что полное акустическое поле $p(r,\varphi,z,t)$ математически записывается в виде суперпозиции конечного числа распространяющихся мод и поля местных волн $\Psi(r,\varphi,z,t)$, экспоненциально затухающих вблизи источника.

$$p(r,\varphi,z,t)=\sum_{m=0}^{M}\sum_{n=0}^{N}A_{nm}J_n\left(k_{r\,n}r\right)\cos\left(m\varphi-\varphi_m\right)e^{-i\left(\omega t-k_{z\,n}z\right)}+\Psi(r,\varphi,z,t) \qquad (1)$$

В задачах о волноводах обычно рассматривается низкочастотный диапазон (ниже первой критической частоты), где возможно распространение только нулевой (поршневой) моды $p(r,\varphi,z,t)=A_{00}e^{-i(\omega t-k_0 z)}$. Описание акустического поля в многогодовом режиме с определением амплитуд гармоник A_{nm} от реального источника представляет сложную математическую задачу.

Для волновода с упругими стенками в аналитической задаче необходимо использовать смешанные граничные условия, учитывающие импеданс z_t на внутренней поверхности волновода:

$$\left(\frac{\partial p}{\partial n}+\frac{i\omega\rho}{z_t}p\right)\Bigg|_{r=R}=\left[\sum_n\left(k_{r\,n}J_0'\left(k_{r\,n}r\right)+\frac{i\omega\rho}{z_t}J_0\left(k_{r\,n}r\right)\right)A_n e^{-i\left(\omega t+\sqrt{k_0^2-k_{r\,n}^2}z\right)}\right]_{r=R}=0 \qquad (2)$$

При таком условии нулевая мода является квазиплоской, имеющей фазовую скорость и акустический импеданс отличный от импеданса плоской волны в безграничном

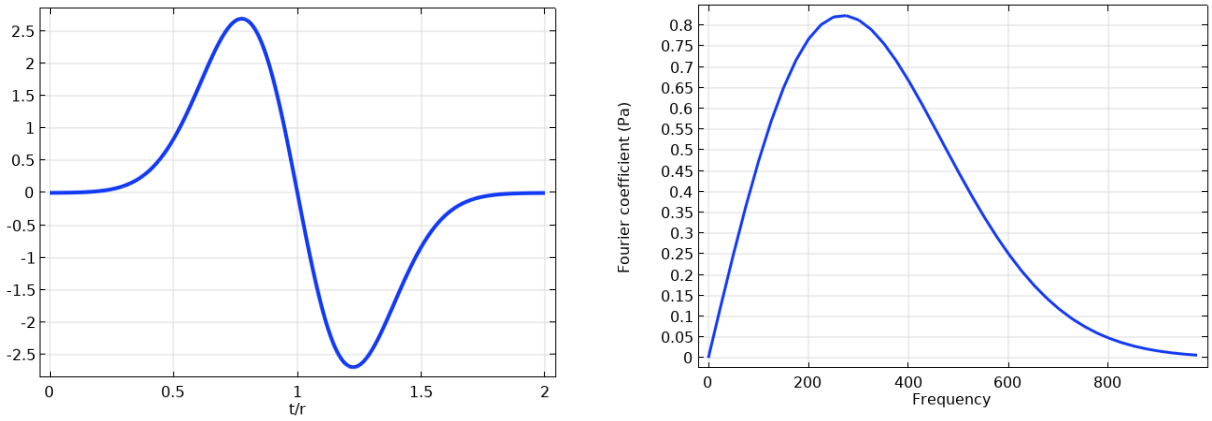
пространстве. Наличие упругих стенок волновода приводит к возникновению дисперсии и затухания звукового импульса. Оценки данных параметров приведены в [2]. В общем виде каждая мода характеризуется своим акустическим импедансом. В работе [3] Е.Л. Шендеровым обобщены результаты нескольких теоретических исследований. Импеданс z_{mn} представляется как функция безразмерного импеданса цилиндрической оболочки (волновода) ς_{nm}, полученной на основе безмоментной теории колебаний.

С точки зрения практики количественная оценка уровней поля на основе аналитических методов удобна в случае одномодового волновода (учитывается распространения только нулевой моды). В случае многомодового режима расчет становится чрезмерно громоздким и в общем случае возможен в определенных приближениях. Для данного типа задач в настоящее время более удобным становится применение численных моделей, значительно упрощающих весь алгоритм. Использование аналитических расчетов остается актуальным в частных случаях с точки зрения верификации получаемых результатов.

3. Результаты расчета акустического поля в волноводе с упругими стенками

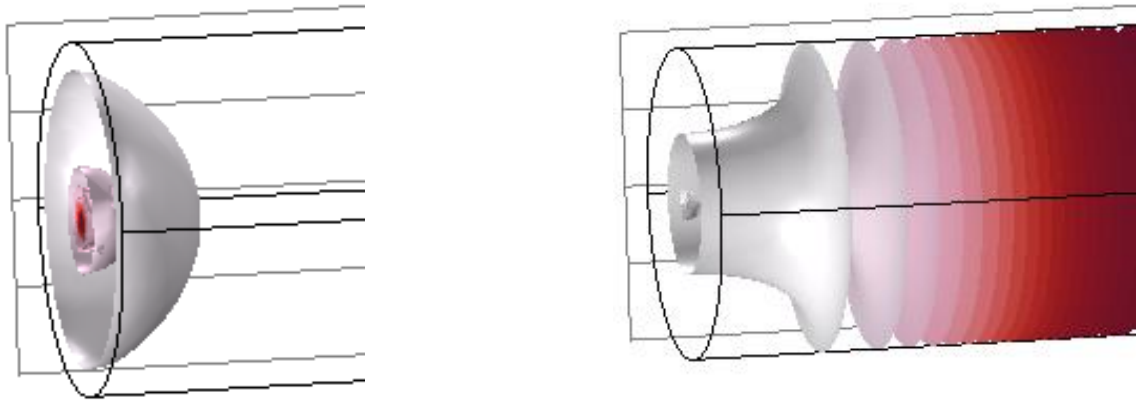
Современное развитие численных методов позволяет решать прикладные задачи акустики с высокой детализацией в описании физических процессов [2,4,5] и без использования многих приближений, свойственных аналитическим методам [1,3]. На практике тональный сигнал является редким исключением. Для исследований, описываемых в статье, был выбран короткий импульс со сплошным спектром. На рис. 2.а показана форма излучаемого импульса монопольным источником в расчетной модели. Для анализа огибающая импульса задавалась функцией Гаусса. Данная форма хорошо интегрируема и дифференцируема, она удобна для численного моделирования различных физических процессов с широкополосным спектром. Длительность импульса была выбрана из условия, чтобы спектр находился в диапазоне от 0 до 1000 Гц (рис.2.б). С учетом выбранного радиуса волновода ($R = 2$ м) и расположения источника (на оси цилиндра) акустическое поле должно было содержать три распространяющиеся радиальные формы.

$$p\left(r,\varphi,z,t\right) = \sum_{n=0}^{3} A_{n0} J_n\left(k_{r\,n} r\right) e^{-i\left(\omega t - k_{z\,n} z\right)} + \Psi\left(r,\varphi,z,t\right) \qquad (3)$$



а) Форма импульса *б) Спектр импульса*

Рисунок 2: Задание импульса от монопольного источника



а) Начальный момент излучения (сферическая волна) *б) Поле местных волн $\Psi(r,\varphi,z,t)$ вблизи источника*

Рисунок 3: Возбуждение звуковой волны в волноводе

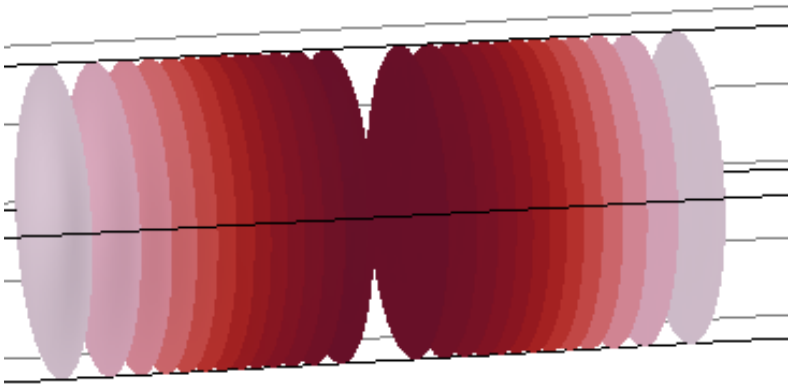


Рисунок 4: Распространяющийся импульс в волноводе с жесткими стенками

На рис.3 показаны изоповерхности звукового давления для начальных моментов излучения сигнала источником. В начальный момент (рис.3.а), пока фронт волны не достиг стенок волновода, излучается сферическая волна. В последующие моменты времени (рис.3.б) происходит взаимодействие волны со стенками волновода, формируется поле местных затухающих волн $\Psi(r,\varphi,z,t)$ вблизи источника и распространяющегося импульсного сигнала. На рис. 4 показаны изоповерхности равного давления для импульса вдали от источника в

волноводе с жесткими стенками. С учетом типа выбранного источника основная мода является поршневой (фронт волны близок к плоской волне). Для поршневой моды в волноводе с жесткими стенками дисперсия и затухание отсутствуют.

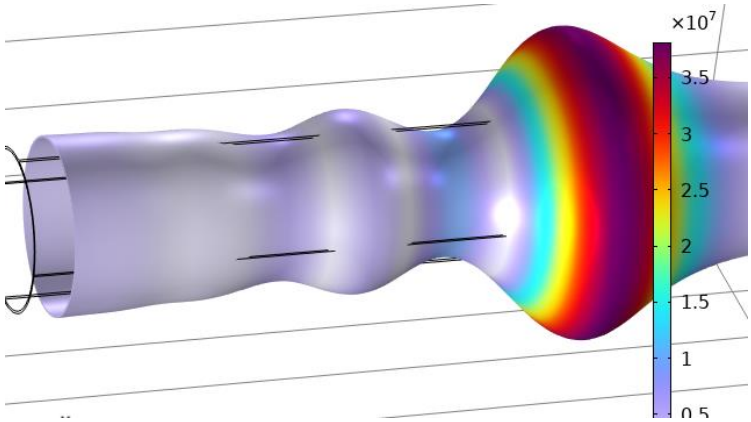


Рисунок 5: Колебания стенок волновода в процессе распространения импульса

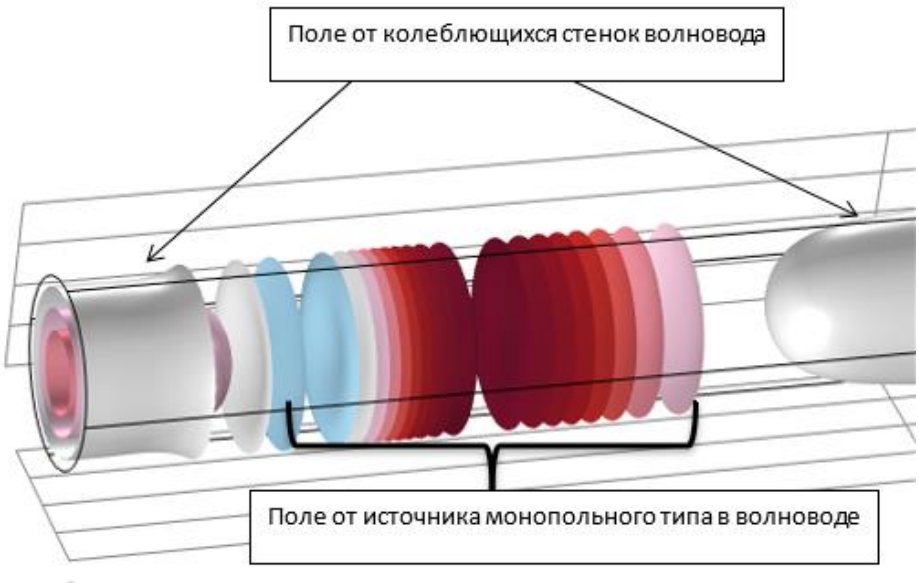


Рисунок 6: Колебания стенок волновода в процессе распространения импульса

На рис.5-6 показан процесс распространения звукового импульса от источника, помещенного в волновод с упругими стенками (в качестве волновода рассматривалась стальная оболочка). Импеданс стенок тонкостенного волновода, заполненного водой, нельзя принимать бесконечно большим и не учитывать его влияние в физическом процессе распространения. Из рис. 5 видно, что в стенках волновода при распространении звукового импульса начинает возбуждаться изгибная волна. Скорость звуковых волн в стальной оболочке превышает скорость звуковых волн в воде. Это создало ситуацию (рис.6), когда звуковое поле формировалось как за распространяющимся импульсом в воде, так и перед ним. Влияние упругих стенок волновода приводило к дисперсии звукового импульса и его затуханию, что согласуется с данными экспериментальных исследований.

5. Заключение

Детализация модели в теоретических расчетах на соответствие реальным физическим процессам может иметь решающее значение в части значимости конечного результата. Конечные результаты часто оказываются чувствительными к точности задания исходных условий. В статье выполнен анализ изменения условий распространения звукового импульса при отказе от приближения абсолютно жестких стенок волновода и учета упругих границ стальной оболочки. Приведенные описания расчетных -моделей могут быть полезны при решении прикладных задач численного моделирования сложных динамических процессов при решении прикладных задач, связанных с снижением шума и вибрации в волноводных системах.

Список литературы

1. *Ржевкин С.Н.*, Курс лекций по теории звука. Изд. Московского университета, 1960, с.337.

2. *Попов Ю.Н., Легуша Ф.Ф.* Поглощение акустической волны в волноводе с импедансными граничными условиями. СПб.: Труды Крыловского государственного научного центра Transactions Of The Krylov State Research Centre. 2021 Номер 2(396) стр. 113-121.

3. *Шендеров Е.Л.*, Волновые задачи гидроакустики. Л. Судостроение,1972. 352 с.

4. *Попов Ю.Н.* Применение численных методов при моделировании распространения акустических волн в волноводах с резонансными поглотителями. Труды Крыловского государственного научного центра. Transactions Of The Krylov State Research Centre. 2024 Номер 4(410) стр. 193-200

5. *Попов Ю.Н.* Численное моделирование акустических устройств на примере резонатора Гельмгольца. Труды Крыловского государственного научного центра. Transactions Of The Krylov State Research Centre. 2024 Номер 3(409) стр. 117-127

УДК: 534.23 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39532

О зависимости акустических мод от параметров среды в волноводе Пекериса – Эйри

Г.Л. Заворохин[1,a], А.А. Мацковский[1,b], П.С. Петров[2,c], А.Д. Захаренко[2,d], S.E. Dosso[3,e]

[1] *Санкт-Петербургское отделение Математического Института им. В.А. Стеклова РАН (ПОМИ РАН), Санкт-Петербург, Россия.*

[2] *Тихоокеанский океанологический институт имени В.И. Ильичева (ТОИ ДВО РАН), лаборатория геофизической гидродинамики, Владивосток, Россия.*

[3] *School of Earth and Ocean Science, University of Victoria, Victoria, Canada.*

E-mail: [a]zavorokhin@pdmi.ras.ru, [b]amatskovskiy@gmail.com, [c]petrov@poi.dvo.ru, [d]zakharenko@poi.dvo.ru, [e]sdosso@uvic.ca

Аннотация: Рассматривается волновод, состоящий из изоскоростного водного слоя и полупространства с линейным профилем квадрата показателя преломления (среда Эйри). Показано, что зависимости горизонтальных волновых чисел нормальных мод от частоты, глубины воды и геоакустических параметров дна описываются обыкновенными дифференциальными уравнениями, которые могут быть решены численно с очень низкими вычислительными затратами. Это позволяет существенно повысить эффективность широкополосного моделирования распространения звука и дисперсионной геоакустической инверсии. Приведены явные формулы для производных горизонтальных волновых чисел по параметрам дна. Предложено новое компактное доказательство дискретности спектра соответствующей задачи Штурма–Лиувилля.

Ключевые слова: нормальные моды, мелководный волновод, среда Эйри, геоакустическая инверсия.

On the dependence of acoustic modes on media parameters in the Pekeris–Airy waveguide

G.L. Zavorokhin[1,a], A.A. Matskovskiy[1,b], P.S. Petrov[2,c], A.D. Zakharenko[2,d], S.E. Dosso[3,e]

[1] *St. Petersburg Department of Steklov Mathematical Institute (PDMI RAS), St. Petersburg, Russia.*

[2] *V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, Vladivostok, Russia.*

[3] *School of Earth and Ocean Sciences, University of Victoria, Victoria, Canada*
E-mail: [a]zavorokhin@pdmi.ras.ru, [b]amatskovskiy@gmail.com, [c]petrov@poi.dvo.ru, [d]zakharenko@poi.dvo.ru, [e]sdosso@uvic.ca

Abstract: A waveguide consisting of an isospeed water layer overlying a halfspace with a linear squared-refractive-index profile (Airy medium) is considered. It is shown that the dependences of the horizontal wavenumbers of normal modes on frequency, water depth, and bottom geoacoustic parameters are described by ordinary differential equations that can be solved numerically at very low computational cost. This provides a substantial increase in efficiency for broadband sound propagation modelling and dispersion-based geoacoustic inversion. Explicit formulas for the derivatives of horizontal wavenumbers with respect to bottom parameters are given. A new concise proof that the spectrum of the corresponding Sturm–Liouville problem is purely discrete is proposed.

Keywords: normal modes, shallow-water waveguide, Airy medium, geoacoustic inversion

PACS: 43.30.Bp, 43.30.Dr, 43.60.Fg

Введение

Стандартный волновод Пекериса (изоскоростной водный слой над однородным дном) является широко используемой моделью в акустике океана. Однако эта модель обладает существенным недостатком: наличие непрерывного спектра (моды излучения) усложняет как теоретический анализ, так и численные расчёты. Одним из способов устранения этой проблемы является замена изоскоростного дна на градиентное полупространство, в котором квадрат волнового числа линейно зависит от глубины (так называемая среда Эйри) [1]. Такой волновод, называемый волноводом Пекериса–Эйри, имеет чисто дискретный спектр, что позволяет представить звуковое поле в виде конечной суммы нормальных мод.

В настоящей работе получены дифференциальные уравнения, описывающие зависимости горизонтальных волновых чисел k_j от частоты ω, глубины водного слоя h и геоакустических параметров дна (α_1, α_2, ρ_2). Эти уравнения позволяют экстраполировать решения, найденные для одного значения параметра, на широкий диапазон изменений параметров, что даёт значительный выигрыш в вычислительной эффективности при широкополосном моделировании и инверсии.

1 Постановка задачи

Рассмотрим задачу Штурма–Лиувилля для нормальных мод [2]:

$$\begin{cases} \dfrac{d^2\phi_j}{dz^2} + \dfrac{\omega^2}{c^2(z)}\phi_j = k_j^2\phi_j, \quad z \in (0,h) \cup (h,\infty), \\ \phi_j\,|_{z=0} = 0, \quad |\,\phi_j\,|_{z=\infty}| \le const, \\ \phi_j\,|_{z=h^-} = \phi_j\,|_{z=h^+}, \quad \dfrac{1}{\rho}\dfrac{d\phi_j}{dz}\Big|_{z=h^-} = \dfrac{1}{\rho}\dfrac{d\ phi_j}{dz}\Big|_{z=h^+}, \end{cases} \tag{1}$$

где k_j – горизонтальное волновое число j-й моды, $\phi_j(z)$ – собственная функция. Скорость звука в воде постоянна: $c(z) = c_1$ при $0 < z < h$. В дне скорость изменяется по n^2-линейному закону (n – индекс преломления):

$$c(z) = \frac{c_1}{\sqrt{\alpha_1 - \alpha_2(z-h)}}, \qquad z > h,$$

с параметрами $0 < \alpha_1 < 1$, $\alpha_2 > 0$. Плотность кусочно-постоянна: ρ_1 в воде, ρ_2 в дне.

2 Зависимость волновых чисел от частоты

Решение (1) в воде имеет вид $\phi_1 = \sin(\lambda z)$, где $\lambda = \sqrt{\omega^2 / c_1^2 - k^2}$. В дне решение выражается через функции Эйри:

$$\phi_2 = \frac{\sin(\lambda h)}{\mathrm{Ai}(g)}\mathrm{Ai}(\tau),$$

где $$g = -\left(\frac{c_1^2}{\omega^2\alpha_2}\right)^{\frac{2}{3}}\left(\frac{\omega^2}{c_1^2}\alpha_1 - k^2\right), \qquad \tau = g + \left(\frac{\omega^2}{c_1^2}\alpha_2\right)^{\frac{1}{3}}(z-h).$$

Условие непрерывности вертикальной компоненты колебательной скорости приводит к дисперсионному соотношению:

$$\frac{\lambda\cot(\lambda h)}{\rho_1}\mathrm{Ai}(g) - \left(\frac{\omega^2}{c_1^2}\alpha_2\right)^{\frac{1}{3}}\frac{\mathrm{Ai}'(g)}{\rho_2} = 0. \tag{2}$$

Дифференцируя (2) по ω и используя уравнение Эйри $\mathrm{Ai}''(x) = x\mathrm{Ai}(x)$, после преобразований получаем выражение для производной $\dfrac{dk}{d\omega}$:

$$\frac{dk}{d\omega} = \frac{\dfrac{2}{3}\lambda\cot(\lambda h)\left(\dfrac{\alpha_2}{c_1^2\omega}\right)^{1/3} + \dfrac{2}{3}\dfrac{2k^2c_1^2 + \omega^2\alpha_1}{\omega^3}A - \dfrac{\omega}{c_1^2\lambda}B}{\dfrac{2c_1^2k}{\omega^2}A - \dfrac{k}{\lambda}B}, \tag{3}$$

где A и B определяются формулами:

$$A = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\lambda^2\cot^2(\lambda h) - \frac{\rho_1}{\rho_2}g\left(\frac{\omega^2\alpha_2}{c_1^2}\right)^{2/3}\right)\left(\frac{\omega}{c_1\alpha_2}\right)^{2/3},$$

$$B = \left(\frac{\omega^2}{c_1^2}\alpha_2\right)^{1/3}\left(\cot(\lambda h) - \frac{\lambda h}{\sin^2(\lambda h)}\right).$$

Уравнение (3) представляет собой обыкновенное дифференциальное уравнение для $k(\omega)$. Оно может быть решено численно (например, методом Рунге–Кутты), при этом начальное условие $k(\omega_0)$ находится однократным решением исходной спектральной задачи. Полученные таким способом дисперсионные кривые практически совпадают с результатами прямого пересчёта для каждой частоты, что подтверждает высокую точность метода.

3 Зависимость от глубины водного слоя и параметров дна

Аналогичным образом выводятся ОДУ для производных k по глубине водного слоя h и по геоакустическим параметрам α_1, α_2, ρ_2. Для случая, когда скорость звука на границе дна $c_2(h)$ постоянна (пологий склон), имеем:

$$\frac{dk}{dh} = \frac{\left(\frac{\omega^2}{c_1^2}\alpha_2\right)^{1/3}\frac{\lambda^2}{\sin^2(\lambda h)}}{2k\left(\frac{c_1^2}{\omega^2\alpha_2}\right)^{2/3}A - \frac{k}{\lambda}B}.$$

Для случая, когда профиль $c_2(z)$ не зависит от h (разломы, каньоны), формула модифицируется добавлением дополнительного слагаемого в числителе. Производные по параметрам дна имеют вид:

$$\frac{dk}{d\alpha_1} = \frac{\left(\frac{\omega^2}{c_1^2\alpha_2}\right)^{1/3}A}{2k\left(\frac{c_1^2}{\omega^2\alpha_2}\right)^{2/3}A - \frac{k}{\lambda}B}, \tag{4}$$

$$\frac{dk}{d\alpha_2} = \frac{\frac{1}{3}\left(\frac{\omega}{c_1\alpha_2}\right)^{2/3}\lambda\cot(\lambda h) - \frac{2}{3\alpha_2}\left(\frac{c_1^2}{\omega^2\alpha_2}\right)^{2/3}\left(\frac{\omega^2}{c_1^2}\alpha_1 - k^2\right)A}{2k\left(\frac{c_1^2}{\omega^2\alpha_2}\right)^{2/3}A - \frac{k}{\lambda}B}, \tag{5}$$

$$\frac{dk}{d\rho_2} = -\frac{\left(\frac{\omega^2}{c_1^2}\alpha_2\right)^{1/3}\lambda\cot(\lambda h)}{\rho_2\left(2k\left(\frac{c_1^2}{\omega^2\alpha_2}\right)^{2/3}A - \frac{k}{\lambda}B\right)}. \tag{6}$$

Эти выражения позволяют, в частности, вычислять чувствительность модовых скоростей к параметрам среды, что необходимо для градиентных методов инверсии.

4 Геоакустическая инверсия

Предложенные выше ОДУ открывают возможность выполнения исчерпывающего перебора

по трёхмерному пространству параметров дна $(\alpha_1, \alpha_2, \rho_2)$ при геоакустической инверсии [3,4]. Алгоритм включает:

1. Однократное решение спектральной задачи для максимальной частоты f_2 в диапазоне $[f_1, f_2]$ в вершине гиперкуба поиска.
2. Интегрирование ОДУ (4–6) по α_1, затем по α_2 и ρ_2, соответственно, для получения $k_j(\alpha_1, \alpha_2, \rho_2, f_2)$ во всех точках сетки.
3. Интегрирование ОДУ (\ref{k}) по частоте для каждой точки пространства параметров, что даёт дисперсионные кривые $k_j(f)$.
4. Вычисление групповых скоростей $v_j^g = d\omega / dk_j$ и сравнение с экспериментальными данными.

Выигрыш в производительности по сравнению с традиционным подходом (многократным решением спектральной задачи для каждой комбинации параметров и каждой частоты) составляет два порядка величины и более. Подробный численный пример приведён в работе [5].

Заключение

В работе показано, что в волноводе Пекериса–Эйри горизонтальные волновые числа нормальных мод и их зависимости от частоты, глубины и геоакустических параметров дна описываются обыкновенными дифференциальными уравнениями первого порядка. Это позволяет на порядки сократить вычислительные затраты при широкополосном моделировании, анализе дисперсии и геоакустической инверсии. Предложенный метод обобщается на многослойные среды с профилями Эйри. Приведено строгое доказательство дискретности спектра задачи Штурма–Лиувилля (1).

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-11-00171).

Список литературы

1. *Westwood E.K., Koch R.A.* Elimination of branch cuts from the normal-mode solution using gradient half spaces // J. Acoust. Soc. Am. 1999. V. 106. P. 2513–2523.
2. *Kuperman W.A., Porter M.B., Schmidt H.* Computational Ocean Acoustics. Springer, 2011.
3. *Bonnel J., Chapman N.R.* Geoacoustic inversion in a dispersive waveguide using warping operators // J. Acoust. Soc. Am. 2011. V. 130. P. EL101–EL107.
4. *Dosso S.E., Wilmut M.J.* Bayesian multiple-source localization in an uncertain ocean environment // J. Acoust. Soc. Am. 2011. V. 129. P. 3577–3589.
5. *Petrov P.S., Zakharenko A.D., Matskovskiy A.A., Zavorokhin G.L., Dosso S.E.* On the dependence of acoustic modes on media parameters in the Pekeris–Airy waveguide // J. Theor. Comput. Acoust. 20253. P.597.

УДК: 534.26 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39533

Исследование точности решений дифракционных задач акустики на основе вычисления энергетических характеристик звуковых волн

М.В. Окороков[1,a], С.А. Скобельцын[1,b]

[1] *ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет». 300012, Тульская область, г. Тула, проспект Ленина, д. 92*

E-mail: [a]maxik_okorokov@mail.ru, [b]skbl@rambler.ru

Аннотация: В настоящей работе для оценки точности аналитических и численных решений дифракционных задач предложено использовать энергетический критерий, выражение для которого получено на основе оптической теоремы. Установлено, что на точность нахождения аналитического решения, зависящую от количества учитываемых слагаемых в бесконечных рядах, влияет волновой размер тела, а не его материал, который, в свою очередь, оказывает воздействие на угловое распределение потока энергии рассеянной волны. Определено, что при использовании подхода, позволяющего с помощью средств MATLAB модифицировать матрицы жесткости и масс в модели, построенной в COMSOL Multiphysics, наблюдается наименьшая погрешность в численном решении.

Ключевые слова: энергетический критерий, точность решения, дифракция звука, количество учитываемых членов ряда, метод конечных элементов.

Study of the accuracy of solutions to diffraction problems in acoustics based on calculation of the energy characteristics of sound waves

M.V. Okorokov[1,a], S.A. Skobel'tsyn[1,b]

[1] *Department of Applied Mathematics and Computer Science, Institute of Applied Mathematics and Computer Science, Tula State University. Tula 300012, Russia*

E-mail: [a]maxik_okorokov@mail.ru, [b]skbl@rambler.ru

Abstract: In this paper, we propose to evaluate accuracy of analytical and numerical solutions to diffraction problems using the energy criterion, the expression for which was derived from the optical theorem. It was established that accuracy of an analytical solution, which depends on the number of terms considered in infinite series, is influenced by the wave size of the body, not its material, which, in turn, affects the angular distribution of an energy flux in a

scattered wave. It was determined that the use the approach that allows for the modification of the stiffness and mass matrices in a model built in COMSOL Multiphysics using MATLAB tools yields the smallest error in a numerical solution.

Keywords: energy criterion, accuracy of solution, sound diffraction, number of terms considered in series, finite element method.

PACS: 43.20.Bi, 43.20.El, 47.35.Rs

Введение

Решение задач дифракции звуковых волн на телах, имеющих различную структуру и конфигурацию, может быть найдено как аналитически, так и численно. В тех случаях, когда выражения для искомых акустических величин представляют в виде разложения в ряд, содержащий бесконечное число слагаемых, возникает определенная погрешность в аналитическом решении, обусловленная учетом конечного количества членов. При использовании численных методов для решения дифракционных задач полученные результаты также будут являться приближенными.

Закон сохранения полной энергии справедлив для всех типов фундаментальных взаимодействий, а оптическая теорема является его следствием. Поэтому универсальным средством для оценки точности решений дифракционных задач предлагается считать энергетический критерий, основанный на оптической теореме. Ее фундаментальная роль в процедуре контроля правильности вычислений при решении задач теории рассеяния подчеркнута в [1], а в [2] отмечено, что в вычислительной дифракции данное соотношение может использоваться для проверки корректности работы компьютерных модулей, предназначенных для расчета требуемых величин.

Рассмотрим модельную задачу о дифракции звука на однородном упругом шаре для того, чтобы продемонстрировать применение энергетического критерия для оценки точности аналитических и численных решений.

1 Постановка модельной задачи и разработка энергетического критерия

Пусть плоская звуковая волна распространяется по направлению оси z декартовой системы координат и имеет амплитуду A, а однородный упругий шар радиуса a находится в идеальной жидкости с плотностью ρ, скорость звука в которой – c. При этом материал тела характеризуется плотностью ρ_1 и постоянными Ламе λ и μ. Необходимо определить акустическое поле, рассеянное шаром.

Звуковое давление падающей волны в сферической системе координат r, θ, φ, имеющей начало в центре тела, запишется следующим образом:

$$p_0 = A\exp(ikr\cos\theta), \tag{1}$$

где k – волновое число в жидкости.

Рассмотрим также представление p_0 в виде суммы бесконечного ряда:

$$p_0 = \sum_{n=0}^{\infty} Ai^n(2n+1)\,j_n(kr)P_n(\cos\theta), \tag{2}$$

где $j_n(x)$ – сферическая функция Бесселя порядка n, $P_n(x)$ – многочлен Лежандра степени n.

Искомое выражение для давления рассеянной волны p_s с учетом условий излучения на бесконечности в дальней зоне акустического поля будет иметь вид:

$$p_s(r,\theta) = \frac{A\exp(ikr)}{kr}F(\theta),$$

где $F(\theta) = \sum_{n=0}^{\infty}(-i)^{n+1}\frac{A_n}{A}P_n(\cos\theta)$, A_n – неизвестные коэффициенты, которые определяются на основе граничных условий.

Согласно оптической теореме в трехмерном случае справедливо равенство [3]:

$$W_s = \frac{4\pi I_0 \operatorname{Im} F(0)}{k^2},$$

где W_s – поток энергии в рассеянной волне, I_0 – интенсивность падающей плоской волны.

Тогда средняя плотность энергии падающей волны равна:

$$\langle w\rangle = \frac{W_s k^2}{\operatorname{Im} F(0)\cdot 4\pi c}. \tag{3}$$

Усредненная за период энергия, падающая на нижнюю половину шара, эквивалентна энергии, заключенной в цилиндре C_1, который выделен в падающем звуковом поле и имеет радиус основания a и высоту $2\pi/k$. Левую часть (3) проинтегрируем по объему C_1, а правую часть – по объему сферического слоя S_1, внутренний радиус которого совпадает с радиусом шара, а внешний радиус r_1 выбран таким образом, чтобы объем S_1 был равен объему C_1. В рассматриваемой задаче: $r_1 = \sqrt[3]{a^2\left(a+\frac{3\pi}{2k}\right)}$. Вычислив интегралы в случае представления падающей волны в виде (1), получим:

$$\langle E_1\rangle = \langle E_2\rangle, \tag{4}$$

где $\langle E_1 \rangle = \frac{\pi^2 A^2 a^2}{k\rho c^2}$, $\langle E_2 \rangle = \frac{W_s k^2}{\operatorname{Im} F(0) \cdot c} \cdot \frac{r_1^3 - a^3}{3}$.

Величина W_s, входящая в выражение для $\langle E_2 \rangle$, в дальней зоне акустического поля также может быть рассчитана следующим образом:

$$W_s = \frac{2\pi}{\rho c k^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{|A_n|^2}{2n+1}.$$

Усредненная за период энергия падающей волны, представленной в виде суммы бесконечного числа сферических гармоник, т.е. записанной с помощью (2), вычисляется так:

$$\langle E_3 \rangle = \frac{A^2 \pi}{\rho c^2} \int_a^{r_1} r^2 \sum_{n=0}^{\infty} (2n+1) \left((j_n'(kr))^2 + (j_n(kr))^2 \left(\frac{n(n+1)}{k^2 r^2} + 1 \right) \right) dr.$$

Эквивалентность (1) и (2) приводит к равенству: $\langle E_1 \rangle = \langle E_3 \rangle$.

Таким образом, выражение для разработанного энергетического критерия имеет вид:

$$\langle E_1 \rangle = \langle E_2 \rangle = \langle E_3 \rangle.$$

Для демонстрации того факта, что в аналитическом решении количество учитываемых членов (N) в рядах влияет на выполнение энергетического баланса, требуется проверить справедливость следующего равенства при различных N:

$$\langle E_2(N) \rangle = \langle E_3(N) \rangle. \quad (5)$$

Оценка погрешности численного решения, позволяющего определить значения отдельных коэффициентов A_n, также может быть произведена по формуле (5). В случае если на основе результатов, найденных численным методом в специализированном компьютерном пакете, не удается получить A_n, для контроля точности расчетов может быть использовано выражение (4).

2 Использование энергетического критерия для оценки точности аналитического и численного решения поставленной задачи

Установлено, что при увеличении параметра ka в аналитическом решении необходим учет большего количества слагаемых в бесконечных рядах, входящих в (5), для достижения энергетического баланса. При этом влияние волнового размера шара на точность выполнения баланса энергетических характеристик не зависит от его материала. Определено, что физические свойства жидкости, содержащей рассматриваемый объект, не оказывают воздействия на погрешность найденного решения дифракционной задачи.

Выявлено, что поток рассеянной энергии в полупространстве распространения падающей волны тем больше, чем плотнее материал упругого шара. Однако, на угловое распреде-

ление величины W_s сильнее влияет замена жидкости, окружающей тело. При увеличении волнового размера шара наблюдается более выраженная локализация рассеянной энергии в определенных угловых секторах. При малом значении параметра ka полярная диаграмма имеет схожую форму с графиком, полученным при падении звука на жидкое сферическое тело. Но с ростом волнового размера объекта лепестки диаграмм проявляются более отчетливо по сравнению со случаем рассеяния плоской звуковой волны на жидком шаре.

Найдено численное решение поставленной дифракционной задачи методом конечных элементов в программной среде для моделирования физических процессов COMSOL Multiphysics. Рассмотрены следующие встроенные размеры конечных элементов, имеющих форму треугольника: «Extra coarse», «Normal», «Extra fine».

Получена формула для вычисления потока энергии рассеянной волны в дальней зоне поля на основе результатов численного решения:

$$W_{far} = \frac{\pi}{\rho c}\left(\left|p_{s,1}\right|^2 \int\limits_0^{\pi\alpha/360} \sin\theta d\theta + \sum_{i=2}^{180/\alpha} \left|p_{s,i}\right|^2 \int\limits_{\pi\alpha(i-1.5)/180+\varepsilon_1}^{\pi\alpha(i-0.5)/180} \sin\theta d\theta + \left|p_{s,180/\alpha+1}\right|^2 \int\limits_{\pi(1-\alpha/360)+\varepsilon_1}^{\pi} \sin\theta d\theta \right), \qquad (6)$$

где $p_{s,i}$ – численно рассчитанное давление рассеянного поля в дальней зоне при $\theta = \pi\alpha(i-1)/180,\ i = 1,2,...,180/\alpha+1,$ α – шаг расчета давления по полярному углу θ (в градусах), $\varepsilon_1 = 10^{-6}$. При этом $\operatorname{Im} F(0) = k \operatorname{Im} p_{s,1} / A.$

С помощью формулы (4) исследована точность численного решения в случае падения плоской звуковой волны единичной амплитуды на шар из алюминия ($\rho_1 = 2700$ кг/м^3, $\lambda = 5.6\cdot10^{10}$ Н/м^2, $\mu = 2.6\cdot10^{10}$ Н/м^2), находящийся в воде ($\rho = 1000$ кг/м^3, $c = 1485$ м/с). Полагалось, что $\alpha = 1^\circ$, а параметр ka принимает значения 1; 3; 5. Определено, что лишь для конечных элементов типа «Extra fine» при $ka = 3$ погрешность в энергетическом балансе не превышает 1%.

Невысокая точность полученных результатов объясняется тем, что для большинства исследованных случаев не выполняется необходимое для более детального описания волнового процесса условие:

$$\lambda_0 / L \geq 10, \qquad (7)$$

где λ_0 – длина волны, L – характерный размер конечного элемента.

Выявлено, что во всех рассмотренных вариантах изменение величин конечных элементов для удовлетворения неравенству (7) позволяет добиться повышения точности численных решений. Модификация размера конечно-элементной сетки также способствует лучшему согласованию форм угловых распределений, соответствующих аналитическому и численному расчету потока рассеянной энергии.

Однако методика изменения встроенных величин конечных элементов имеет недостатки. Во-первых, при использовании данного способа по-прежнему не представляется возможным оценка точности численного расчета отдельных коэффициентов A_n. Во-вторых, подход (6), который применяется при вычислении W_{far}, сам допускает определенную долю погрешности и тем самым приводит к снижению точности найденных результатов.

Для преодоления указанных сложностей предложено использовать методику, согласно которой в модели, полученной в COMSOL Multiphysics, необходимо с помощью компонентов языка программирования MATLAB соответствующим образом модифицировать матрицу жесткости и матрицу масс. Установлено, что по сравнению с другими подходами, рассмотренными в настоящей работе, при применении данного способа достигается наиболее высокая точность численных решений.

Заключение

Исходя из вышеперечисленного, можно сделать вывод, что энергетический критерий, разработанный на основе оптической теоремы, позволяет оценить точность аналитических и численных решений дифракционных задач. Определено, что на погрешность аналитического расчета искомых величин влияет волновой размер шара. Распределение потока энергии рассеянной волны по угловым секторам неодинаково для случаев жидкого и упругого тел сферической формы. Выявлено, что для достижения наилучшей точности численных решений предпочтительнее использовать подход, основанный на модификации средствами языка программирования MATLAB матрицы жесткости и матрицы масс в модели, созданной в COMSOL Multiphysics.

Список литературы

1. *Андронов И.В.* Оптическая теорема для системы пластина – стратифицированная жидкость. // Акуст. журн. 1993. **39**, вып. 1. С. 13–18.
2. *Mackowski D.W.* Calculation of total cross sections of multiple-sphere clusters. // J. Opt. Soc. Am. A. 1994. **11**, N 11. P. 2851–2861.
3. *Шендеров Е.Л.* Излучение и рассеяние звука. Судостроение. Л., 1989.

Исследование влияния геометрии резонаторов Гельмгольца на их акустические характеристики с применением методов машинного обучения

Глазко Л.А.[1)], Ли Юн [2)], Хватов А.А.,[1)], Богданов А.А.[1), 3)]
[1)] Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, Россия;
[2)] Университет Тунцзи, г. Шанхай, Китай;
[3)] Харбинский инженерный университет, г. Циндао, Китай.
Тел.: +7(951)038-5442;
E-mail :lana.glazko@metalab.ifmo.ru

Изучение геометрических факторов, определяющих резонансные свойства акустических систем, остается одной из актуальных задач современной акустики. Несмотря на существование различных аналитических моделей, описание резонаторов Гельмгольца до настоящего времени не имеет строгого и общего подхода, позволяющего в полной мере учитывать форму резонатора. В данной работе предлагается подход к исследованию резонаторов Гельмгольца, основанный на параметризации их геометрии при сохранении постоянного объема полости. Основной целью является выявление зависимости резонансных частот и распределений акустического давления от формы резонатора. Показано, что резонансная частота существенно зависит от геометрии резонатора и может отличаться от оценок, получаемых в рамках классических моделей. Для получения уточненных зависимостей используется сочетание численных методов и методов машинного обучения, включая методы автоматического поиска уравнений. Полученные результаты позволяют разрабатывать более точные модели, описывающие резонансное поведение резонаторов различной геометрии, которые могут быть использованы при проектировании акустических метаматериалов и устройств с заданными спектральными характеристиками.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 25-79-31027.

Ключевые слова: резонаторы Гельмгольца, параметризация геометрии, резонансные свойства, машинное обучение

INVESTIGATION OF GEOMETRIC FACTORS AFFECTING THE RESONANT PROPERTIES OF HELMHOLTZ RESONATORS

Glazko L.A.[1)], Li Yong [2)], Hvatov A.A.,[1)], Bogdanov A.A.[1), 3)]

[1)] ITMO University, Saint Petersburg, Russia;

2) Tongji University, Shanghai, China;

3) Harbin Engineering University, Qingdao, China;

Tel.: +7(951)038-5442; E-mail: lana.glazko@metalab.ifmo.ru

The investigation of geometric factors determining the resonant properties of acoustic systems remains an important task in modern acoustics. Despite the existence of various analytical models, the description of Helmholtz resonators still lacks a rigorous and general approach that fully accounts for the resonator shape. This work presents an approach to studying Helmholtz resonators based on geometry parameterization while maintaining a constant cavity volume. The main goal is to identify the dependence of resonance frequencies and acoustic pressure distributions on the resonator shape. It is shown that the resonant frequency significantly depends on the geometry of the resonator and may differ from estimates obtained within classical models. To derive refined relationships, a combination of numerical methods and machine learning techniques, including equation discovery, is employed. The obtained results make it possible to develop more accurate models describing the resonant behavior of resonators with different geometries, which can be used in the design of acoustic metamaterials and devices with specified spectral characteristics.

The work is funded by Russian Science Foundation grant № 25-79-31027.

Keywords: Helmholtz resonators, geometric parameterization, resonant properties, machine learning

УДК: 534.2 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39534

Моделирование распространения звукового удара от демонстратора сверхзвукового гражданского самолета в условиях сильной атмосферной турбулентности

А.О. Корунов[1,2,a], В.А. Гусев[3,b]

[1] *Московский физико-технический институт (МФТИ), Институтский переулок, 9, Долгопрудный, 141701, Россия.*

[2] *Центральный аэрогидродинамический институт (ЦАГИ), ул. Жуковского, 1, г. Жуковский, Московская область, 140180, Россия.*

[3] *Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, физический факультет, Ленинские горы, Москва, 119991, Россия.*

E-mail: [a]korunov.ao@phystech.edu, [b]vgusev@bk.ru

Аннотация: В рамках линейной акустики идеальной движущейся среды получено волновое уравнение, описывающее акустическое давление в приземном слое атмосферы с учетом членов, квадратичных по числу Маха невозмущенного течения. В результате перехода в сопровождающую систему координат получены главные приближения для эффектов дифракции и переноса возмущений турбулентными пульсациями в приземном слое атмосферы. С применением этих результатов сформированы модели типов HOWARD и ХЗК, учитывающие акустическую нелинейность, термовязкое поглощение и релаксацию в атмосфере. На основе уравнения типа ХЗК в двумерной постановке проведено численное моделирование распространения звукового удара от разрабатываемого в ЦАГИ демонстратора сверхзвукового гражданского самолета в условиях сильной турбулентности в приземном слое атмосферы, представленной пульсациями скорости. Достигнуты сеточная и статистическая сходимости результатов моделирования. Трехскачковая структура передней части профиля избыточного давления от демонстратора приводит к малому изменению амплитуды и существенному снижению громкости в метрике PL по сравнению с результатами, полученными для N-волн в сходных условиях.

Ключевые слова: звуковой удар, атмосферная турбулентность, демонстратор сверхзвукового гражданского самолета, уравнения типов HOWARD и ХЗК.

Simulation of Civil Supersonic Aircraft Sonic Boom Propagation Under Conditions of Strong Atmospheric Turbulence

A.O. Korunov[1,2,a], V.A. Gusev[3,b]

[1] *Moscow Institute of Physics and Technology (MIPT), Institutsky Lane 9, Dolgoprudny, Moscow Region, 141700 Russia.*

[2] *Central Aerohydrodynamic Institute (TsAGI), Zhukovsky, 140180 Russia.*

[3] *Moscow State University, Faculty of Physics, Moscow, 119991 Russia.*

E-mail: [a]korunov.ao@phystech.edu, [b]vgusev@bk.ru

Abstract: Within the framework of linear acoustics of ideal moving medium the wave equation for the acoustic pressure is obtained, accounting for terms quadratic in the undisturbed flow Mach number. As a result of the transition to a wave-following reference frame, leading-order approximations for diffraction and turbulent transport effects in the atmospheric boundary layer are found. Using these results, HOWARD and KZK type models are developed, accounting for acoustic nonlinearity, thermoviscous absorption, and relaxation in the atmosphere. Based on the KZK type equation in two-dimensional formulation, numerical modelling of sonic boom propagation from civil supersonic aircraft demonstrator under development in TsAGI is performed under strong turbulence in atmospheric boundary layer represented by velocity fluctuations. Mesh and statistical convergence of the results is achieved. The three-shock structure of the demonstrator's overpressure signature front part leads to a small change in amplitude and a significant reduction loudness in the PL metric compared to the results obtained for N-waves under similar conditions.

Keywords: sonic boom, atmospheric turbulence, civil supersonic aircraft demonstrator, HOWARD and KZK type equations.

PACS: 43.28.Mw

Введение

Актуальная на сегодняшний день задача разработки сверхзвукового гражданского самолета (СГС) второго поколения [1] тесно связана с развитием технологий, обеспечивающих удовлетворение современным требованиям, предъявляемым к летательным аппаратам (ЛА) такого типа. Одна из таких технологий связана с обеспечением приемлемого уровня звукового удара (ЗУ) на земле.

На сегодняшний день не существует единой установленной меры воздействия ЗУ на человека и инфраструктуру. В современных работах широко используется «громкость» ЗУ

в метрике PL (Perceived Loudness) [2], учитывающая спектральный состав временного профиля волны. Эта характеристика выбрана в качестве целевой в рамках текущей работы.

Наиболее высокие уровни интенсивности ЗУ наблюдаются в условиях фокусировки волн. В частности, фокусировка может быть вызвана мелкомасштабной турбулентностью в приземном слое атмосферы. С точки зрения геометрической акустики, турбулентные флуктуации приводят к искривлению волнового фронта с возникновением областей сгущения и разрежения геометроакустических лучей. Распространение искривленного фронта приводит к возникновению каустик — огибающих семейства лучей. Положение каустик, порожденных турбулентными пульсациями, приближенно отражает геометрию узких областей фокусировки, где амплитуда волн может увеличиваться в несколько раз, о чем свидетельствуют результаты численного моделирования [3].

Данная работа посвящена анализу статистических характеристик ЗУ на земле от разрабатываемого в ЦАГИ демонстратора СГС в условиях атмосферной турбулентности на основе решения уравнения типа ХЗК, описанного в разделе 1. Постановка задачи описана в разделе 2. Анализ результатов моделирования представлен в разделе 3.

1 Эволюционные уравнения типов HOWARD и ХЗК

В данной работе показано, что в высокочастотном приближении основные эффекты, связанные с дифракцией слабых ударных волн в медленно движущейся турбулентной атмосфере, описываются однонаправленным уравнением:

$$\frac{\partial p'}{\partial x} = \frac{\bar{c}_0}{2}\int_{-\infty}^{\tau} \Delta p' d\tau' + \frac{u_x}{\bar{c}_0^2}\frac{\partial p'}{\partial \tau} + \frac{\gamma}{2\bar{c}_0^3}\frac{\partial p'}{\partial \tau}. \qquad (1)$$

Здесь p' — акустическое давление, x — координата вдоль основного направления распространения волны, $\tau = t - \dfrac{x}{\bar{c}_0}$ — фазовая переменная, Δ — оператор Лапласа в прямоугольных декартовых координатах (x, y, z), $c_0 = \bar{c}_0 + c'$ — скорость звука, представленная в виде суммы постоянного среднего значения $\bar{c}_0$ и турбулентной пульсации c', u_x — x-компонента вектора турбулентных пульсаций скорости $\mathbf{u}$. В третьем слагаемом правой части уравнения (1) введено обозначение $\gamma = \bar{c}_0^2\left(1 - \dfrac{\bar{c}_0^2}{c_0^2}\right)$.

Первое слагаемое правой части (1) описывает вклад дифракционных эффектов, а второе и третье – турбулентных пульсаций скорости и температуры (скорости звука). Видно, что в главном приближении действие турбулентных неоднородностей сводится к случайному фазовому сдвигу профилей волны ЗУ. В результате сдвигов происходит

мелкомасштабная фокусировка и дефокусировка волн, что повышает роль дифракционных эффектов.

В результате дополнения слагаемыми правой части (1) уравнения Бюргерса, подробно описанного в работе [4], получено уравнение типа HOWARD, имеющее в двумерной постановке вид:

$$\frac{\partial p'}{\partial s} = \frac{\bar{c}_0}{2}\int_{-\infty}^{\tau}\left(\frac{\partial^2 p'}{\partial s^2}+\frac{\partial^2 p'}{\partial y^2}\right)d\tau' + \frac{\beta}{2\rho_0\bar{c}_0^3}\frac{\partial p'^2}{\partial \tau} + \frac{1}{B}\frac{\partial B}{\partial s}p' + \frac{u_s}{\bar{c}_0^2}\frac{\partial p'}{\partial \tau} + \frac{\gamma}{2\bar{c}_0^3}\frac{\partial p'}{\partial \tau} + \frac{\delta + R}{2\rho_0\bar{c}_0^3}\frac{\partial^2 p'}{\partial \tau^2}. \qquad (2)$$

Здесь s — координата вдоль луча, приходящего на верхнюю границу атмосферного пограничного слоя, y — поперечная к лучу координата, β — коэффициент нелинейности среды, B — коэффициент в инварианте акустической энергии Блохинцева, δ — термовязкий коэффициент среды, R — оператор релаксации (учитываются релаксации кислорода и азота). Лучевые координаты, в которых записано уравнение (2), связаны с базовым лучом, распространяющимся в слоистой атмосфере со средними параметрами (то есть без турбулентности). Уравнение (2) моделирует статистический ансамбль волн, являющихся реализациями прохождения ЗУ вдоль этого луча, пренебрегая криволинейностью системы координат, но эффективно учитывая геометрическое рассеяние фронта с помощью связанного с этим лучом коэффициента B. В данной работе решается уравнение типа ХЗК, получаемое из (4) отбрасыванием второй производной $\frac{\partial^2 p'}{\partial s^2}$ в дифракционном операторе.

2 Постановка задачи

Целевая задача данной работы решалась в три этапа. На первом этапе путем решения уравнений Рейнольдса получена картина обтекания компоновки демонстратора в расчетном режиме полета (число Маха M=1.5, высота полета 15 км) в условиях стандартной атмосферы. Второй этап включает моделирование распространения волны ЗУ от ЛА до верхней границы турбулентного пограничного слоя атмосферы путем решения уравнения Бюргерса с учетом нелинейности, геометрического рассеяния, термовязкого поглощения и молекулярной релаксации [4]. В данной статье выбрано характерное значение толщины турбулентного пограничного слоя 1000 м. В результате решения уравнения Бюргерса были получены профили избыточного давления (рис. 1) на высоте 1000 м (рис. 1, *а*) и на земле (рис. 1, *б*). Для учета отражения от земли профиль избыточного давления был умножен на коэффициент 1.9. Громкость в профиле волны на верхней границе пограничного слоя равна 89.65 PLдБ. Максимальное значение избыточного давления в профиле волны (амплитуда) и громкость на земле без учета отражения равны $p_1' = 14.81$ Па и $L_1 = 89.02$ PLдБ. Соответствующие значения с учетом отражения – $p_2' = 28.14$ Па и $L_2 = 94.79$ PLдБ.

Профиль избыточного давления на верхней границе пограничного слоя (рис. 1, *а*) служит в качестве начального условия на третьем этапе решения задачи, включающем численное решение уравнения типа ХЗК (уравнения (2) с отброшенной производной $\frac{\partial^2 p'}{\partial s^2}$). Начальный фронт в текущей работе считался плоским. Численное решение (2) производилось на основе схемы расщепления операторов первого порядка [4]. Дифракционная задача (первое слагаемое правой части) решалась с помощью схемы Кранка-Николсона в конечно-разностной постановке [3]. Нелинейная задача (второе слагаемое)

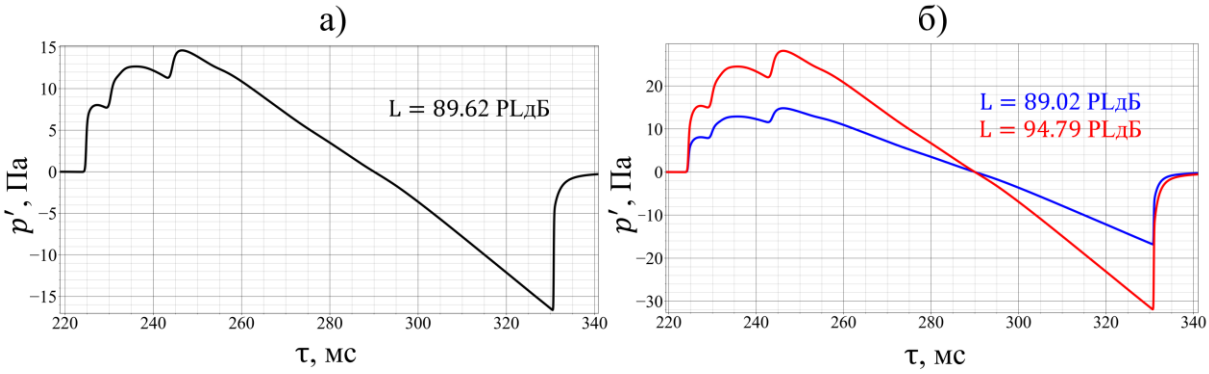


Рисунок 1 — Профили волны ЗУ на высоте 1000 м (а) и на земле без учета (синяя линия) и с учетом (красная линия) отражения (б)

решалась методом конечных объемов с использованием схемы SSP3 для интегрирования по *s* и схемы WENO5 для аппроксимации потоков на гранях ячеек. Турбулентный перенос (четвертое и пятое слагаемые) разрешался на основе точного решения в частотной области с использованием дискретного преобразования Фурье.

Турбулентность в приземном слое атмосферы представлена однородными изотропными пульсациями скорости, для создания которых в данной работе выбран случай «сильной» атмосферной турбулентности на основе результатов [5]. В приближении однородной изотропной турбулентности применяется энергетический спектр фон Кармана

$$E(k)=\frac{55}{9\sqrt{\pi}}\frac{\Gamma(5/6)}{\Gamma(1/3)}\frac{u'^2}{k_e}\frac{(k/k_e)^4}{\left[1+(k/k_e)^2\right]^{17/6}},$$

где u'^2 — дисперсия пульсаций одной компоненты скорости, k_e — волновое число, характеризующее энергонесущие масштабы, $\Gamma(z)$ — гамма-функция. В соответствии с [5], дисперсия u'^2 связана с масштабом скорости в перемешанном слое атмосферы w^* соотношением $u'^2=0.35w^{*2}$, а параметр k_e рассчитывается исходя и связи масштаба $L_e=2\pi/k_e$ с толщиной пограничного слоя z_i [5] $L_e=2\pi\times0.23z_i$. В условиях сильной турбулентности $w^*=2.66$ м/с. Толщина пограничного слоя в данной работе принята равной $z_i=1000$ м. Скалярные пульсации в данной работе не рассматриваются и $\gamma=0$.

3 Результаты расчетов

Для оценки уровня ошибки результатов был проведён анализ сходимости решения с измельчением сетки. При этом частота дискретизации по фазовой переменной τ фиксировалась равной 32 кГц. В результате проведения расчетов на вложенной по пространству системе сеток при пространственных шагах сетки $\Delta s = 1$ м $\Delta y = 0.5$ м были получены уровни ошибки 0.04 PLдБ и 0.03 PLдБ вычисления среднего значения и дисперсии громкости. Данный уровень ошибки принят удовлетворительным, а сетка с указанными пространственными шагами выбрана в качестве расчетной. Для обеспечения репрезентативности статистической выборки было проведено 10 расчетов шириной 2 км, в каждом из которых реализация турбулентного поля отличалась, но статистические параметры были одинаковыми. Показано, что при данном числе расчетов ошибки, связанные с конечностью статистической выборки, сравниваются с обозначенными выше ошибками численного расчета.

На основе полученных результатов рассчитаны кумулятивные вероятности превышения амплитудой в профиле волны номинального значения p_1' на 20 % и 30 % в зависимости от продольной координаты s (рис. 2, *а*). Видно, что эффективность фокусировки существенно снижена по сравнению со случаем N-волн той же амплитуды [3], так что вероятность превышения на 30 % не превышает 1 %. Данный уровень вероятности соответствует двухкратному превышению максимального давления в N-волне с начальной амплитудой 10 Па [3].

Распределения кумулятивной вероятности превышения громкостью номинального значения L_1 на 2, 3 и 6 PLдБ, изображенные на рис. 2, *б*, в отличие от зависимостей для амплитуды демонстрируют немонотонное поведение и наличие максимума, соответствующего дистанции распространения волны порядка 450 м. Максимальное значение 12.5 % вероятности превышения номинального значения на 2 PLдБ более чем в два раза превосходит значение 5 %, полученное в случае превышения на 3 PLдБ. При этом вероятности превышения на 6 PLдБ оказываются практически нулевыми и не превосходят значение 0.33 %, достигаемое на дистанции 1116.5 м, в то время как для N-волн с амплитудами 10 и 20 Па получено значение в максимуме около 3% [3].

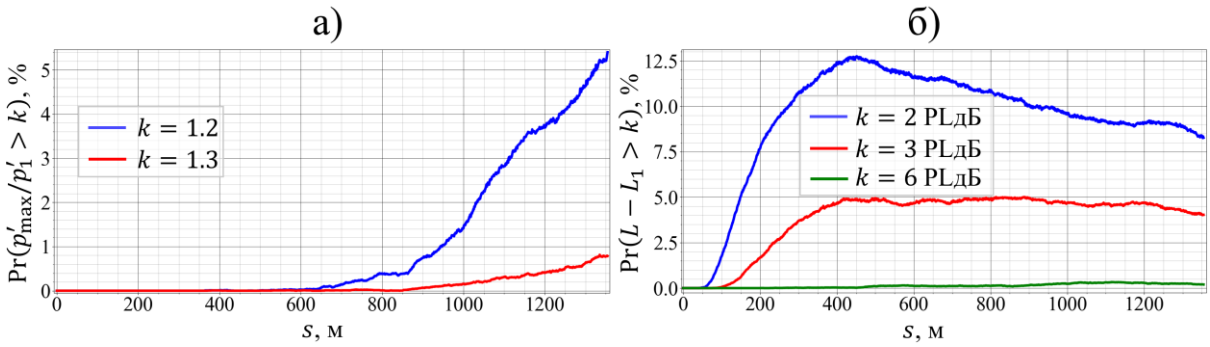


Рисунок 2 — Кумулятивные вероятности превышения амплитудой (а) и громкостью (б) номинального значения в k раз и на k PLдБ соответственно

Статистика амплитуды и громкости ЗУ на земле с учетом отражения описывается изображенными на рис. 3 распределениями. В результате слабого изменения среднего значения амплитуды номинальное значение p'_2 оказалось в центре распределения амплитуды (рис. 3, *а*). Вероятность превышения данного значения составила 53.16 %. Если полагать, что значение вероятности 0.1 % достаточно мало, чтобы считать соответствующее событие невозможным, то для максимального реализующегося значения амплитуды получится величина 40.0 Па. Вероятность превышения номинального значения громкости L_2 составила 28.26 %, чему послужила трехскачковая структура передней части начального профиля волны (рис. 1, *а*) и снижение эффективности фокусировки за дистанцией распространения порядка 450 м (рис. 2, *б*). Уровень вероятности 0.1 % для громкости соответствует значению 102.0 PLдБ.

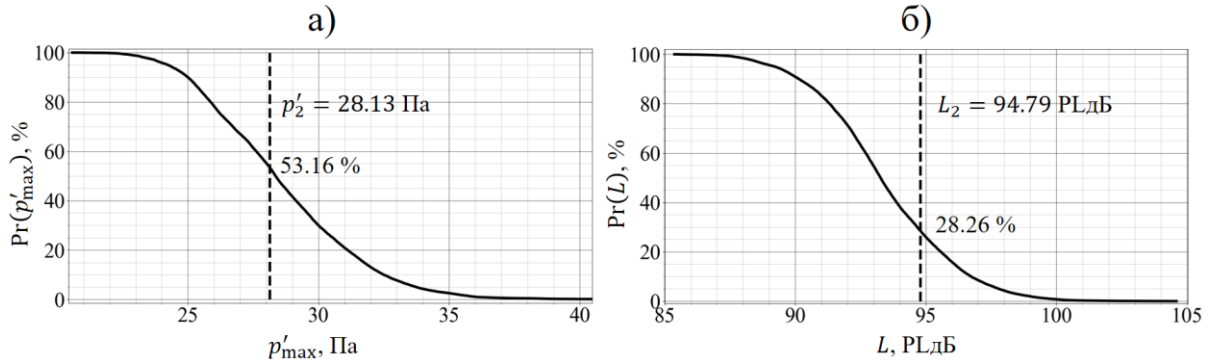


Рисунок 3 — Вероятности превышения амплитуды (а) и громкости (б) на земле в зависимости от пороговых значений

Заключение

В серии расчетов достигнута сходимость по шагу сетки и по числу реализаций поля турбулентных пульсаций. Показано, что при толщине турбулентного пограничного слоя порядка 1 км выборка становится репрезентативной при ширине моделируемого участка более 20 км. Установлено, что амплитуда в профиле волны избыточного давления от демонстратора ЦАГИ (по-видимому, в силу сложной трехступенчатой структуры переднего скачка) не является чувствительной к фокусировке волн при распространении в

турбулентном пограничном слое атмосферы, как это наблюдалось в случае N-волны. При этом вероятности превышения громкостью номинального значения существенно снижаются. Полученные данные свидетельствуют о существенном различии результатов оценки интенсивности звукового удара, основанной на амплитуде в профиле волны и громкости в метрике PL.

Список литературы

1. *Chernyshev S.L., Pogosyan M.A., Sypalo K.I.* On ecologically-safe high-speed vehicles: conceptual design study of the next ganaration supersonic transport // Acta Astronautica. 2024. **216**. pp. 437-445.
2. *Bonavolontà G., Lawson C., Riaz A.* Review of Sonic Boom Prediction and Reduction Methods for Next Generation of Supersonic Aircraft // Aerospace. 2023. **10**, No. 11. pp. 917-961.
3. *Юлдашев П.В., Карзова М.М., Хохлова В.А., Блан-Бенон Ф.* Численное моделирование нелинейного параболического уравнения для анализа статистики воспринимаемого уровня шума волны звукового удара после прохождения турбулентного слоя атмосферы // Акустический журнал. 2021. **67**, № 1. С. 31-44.
4. *Chernyshev S.L., Gorbovskoy V.S., Kazhan A.V., Korunov A.O.* Re-entry vehicle sonic boom issue: Modelling and calculation results in windy atmosphere based on the augmented Burgers equation // Acta Astronautica. 2022. **194**. pp. 450-460.
5. *Wilson D.K.* A three-dimensional correlation/spectral model for turbulent velocities in a convective boundary layer // Boundary-Layer Meteorology. 1997. **85**. pp. 35–52.

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39535

МОДЕЛИ ОЦЕНКИ СРЕДНЕЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ДИСКРЕТНЫХ ДОННЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ПРИ АКУСТИЧЕСКОМ МОНИТОРИНГЕ ДНА

Грязнова И.Ю.[1)], Лабутина М.С.[2)], Сечин Е.М.[1)]
[1)] Нижегородский государственный университет;
[2)]Нижегородский филиал ВШЭ.

Тел.: (951 9047617); E-mail: gryaznova@rf.unn.ru

Акустические методы являются основным инструментом для дистанционного исследования морского дна, поскольку позволяют получать данные о донной структуре без непосредственного контакта. Одним из ключевых параметров, поддающихся измерению при обратном акустическом зондировании, является средняя интенсивность рассеянного сигнала, чувствительная к распределению донных неоднородностей. В настоящей работе численно исследуются различные модели пространственного размещения дискретных, случайным образом расположенных по дну рассеивателей и их влияние на оценку средней поверхностной концентрации неоднородностей по результатам измерения средней интенсивности обратного рассеяния.
Ключевые слова: акустическое зондирование, дискретные неоднородности, обратное рассеяние, средняя концентрация, средняя интенсивность

Acoustic methods are the main tool for remote seabed investigation, since they make it possible to obtain data on bottom structure without direct contact. One of the key parameters measurable in acoustic backscattering sounding is the mean intensity of the scattered signal, which is sensitive to the distribution of bottom inhomogeneities. In this paper, various models of spatial distribution of discrete scatterers randomly located on the bottom and their influence on estimating the mean surface concentration of inhomogeneities from measurements of the mean backscattered intensity are numerically studied.
Keywords: acoustic sounding, discrete inhomogeneities, backscattering, mean concentration, mean intensity.

Введение

Несомненную актуальность имеет дистанционное акустическое зондирование океана, в том числе поверхности океанического дна, что позволяет решить ряд важных практических задач, в том числе задач обнаружения месторождений железомарганцевых конкреций на дне океана [1]. Железомарганцевые конкреции представляют большой интерес как многокомпонентные руды. Располагаются они, как правило, на илистых осадочных донных породах, слабо отражающих акустические волны, в глубоководных районах океана.

Целью настоящей работы является исследование эффектов, возникающих при дистанционной акустической диагностике донных дискретных случайных неоднородностей. В работе проведен анализ средней интенсивности обратного рассеяния акустических волн на дискретных случайных неоднородностях и рассмотрены различные модели оценки средней концентрации дискретных неоднородностей по данным акустического зондирования дна. Частичные результаты, связанные с анализом различных моделей оценки средней концентрации дискретных донных неоднородностей, были ранее представлены в работе [4].

1. Случайная (некоррелированная) модель размещения донных дискретных неоднородностей

В качестве базовой модели рассматривалось хаотическое, в среднем равномерное размещение дискретных неоднородностей на плоской донной поверхности. Такая модель соответствует случаю отсутствия пространственной корреляции между положениями рассеивателей и может рассматриваться как простейшее приближение при оценке средней поверхностной концентрации неоднородностей по характеристикам обратно рассеянного сигнала [2].

Схема зондирования донной поверхности показана на рисунке 1. Источник-приёмник расположен над плоским дном, а распределение падающего поля по зондируемой области имеет максимум вблизи оси излучателя и убывает к периферии. В расчетах использовалась океаническая постановка задачи для квадрата размером 160×160 м при глубине $h = 4000$ м, апертуре излучателя $D = 5$ м и длине волны $\lambda = 0{,}20$ м.

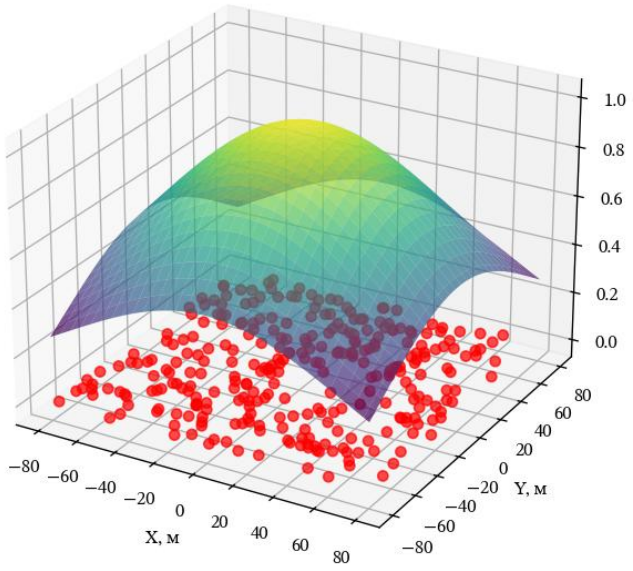


Рис. 1. Визуализация зондируемой плоскости и интенсивности падающего сигнала.

Результаты моделирования случайной модели приведены на рисунке 2. На графике представлена зависимость средней интенсивности обратного рассеяния от общего числа неоднородностей N, усредненная по 100 реализациям. Видно, что с ростом числа рассеивателей средняя интенсивность монотонно возрастает и сохраняет характер, близкий к квадратичному. Это указывает на существенный вклад когерентного сложения рассеянных волн в пределах центральной части озвученной области.

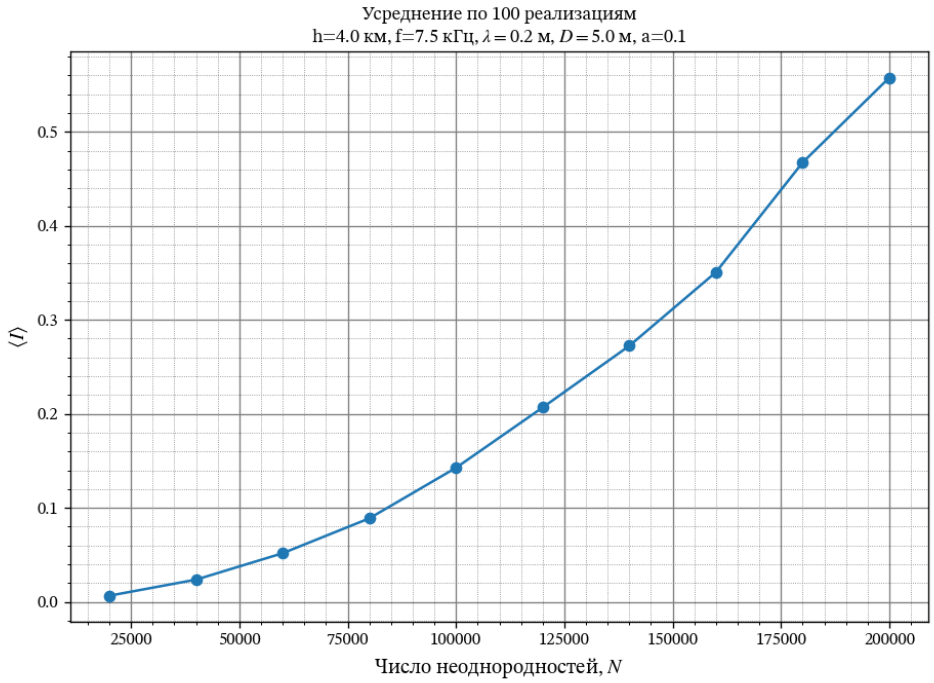


Рис. 2. Зависимость средней интенсивности обратного рассеяния от числа неоднородностей N, усредненная по 100 реализациям.

Таким образом, случайная модель может использоваться в качестве базовой при решении обратной задачи акустической диагностики. Однако даже в этом простейшем случае связь между средней интенсивностью обратного рассеяния и средней поверхностной концентрацией неоднородностей определяется не только общим числом частиц, но и геометрией зондирования.

2. Кластерная модель с Гауссовой плотностью распределения неоднородностей

Следующим этапом было рассмотрено кластерное размещение неоднородностей, при котором частицы группируются в локальные области повышенной плотности. В качестве модели распределения неоднородностей внутри кластера использовалось двумерное Гауссово распределение. Такая постановка позволяет учитывать коррелированность взаимного расположения рассеивателей и тем самым приблизить модель к более реалистической структуре донной поверхности.

Для данной модели использовалась зондируемая область размером 160×160 м, число кластеров $K = 25$, а число неоднородностей в каждом кластере принималось равным 5000. Основным варьируемым параметром являлась ширина кластера σ, определяющая степень пространственного размытия скоплений. На рисунке 3(а) показана характерная карта распределения неоднородностей при $\sigma = 12$ м.

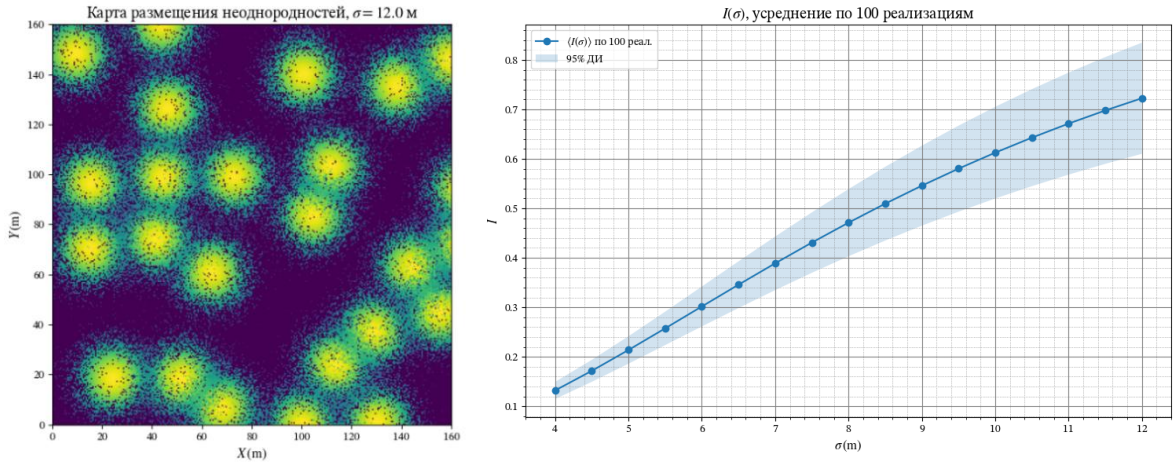


Рис. 3. (а) Карта распределения неоднородностей для гауссовой кластерной модели при $\sigma = 12$ м; (б) зависимость средней интенсивности обратного рассеяния от ширины кластера σ, усредненная по 100 реализациям.

На рисунке 3(б) представлена зависимость средней интенсивности обратного рассеяния от ширины кластера σ, усредненная по 100 реализациям. Видно, что с ростом σ средняя интенсивность монотонно возрастает. Это связано с тем, что при расширении кластеров изменяется эффективная апертура переизлучающих областей, вследствие чего увеличивается доля энергии, возвращающейся в приемник.

По сравнению со случайной моделью кластерное распределение приводит к изменению характера формирования обратно рассеянного сигнала. В этом случае при одной и той же средней концентрации неоднородностей интенсивность определяется уже не только их общим числом, но и степенью локального сгущения частиц на донной поверхности. Следовательно, при оценке средней поверхностной концентрации необходимо учитывать возможную кластеризацию рассеивателей.

3. Кластерная модель с отрицательной корреляцией размеров кластеров

Для описания более сложной пространственной структуры донных неоднородностей была рассмотрена модель, в которой размеры кластеров являются статистически зависимыми. В данной постановке увеличение размеров одного или нескольких кластеров сопровождается уменьшением размеров остальных, что соответствует отрицательной корреляции между ними. Такое распределение формируется с использованием случайного вектора β, задающего перераспределение общего «ресурса» между кластерами [3].

Расчеты проводились для области 160×160 м при числе кластеров $K = 30$. Число неоднородностей в каждом кластере определялось величиной $\lfloor 25000\beta_j \rfloor$, а дополнительно учитывался локальный шум радиусов частиц. На рисунке 4(а) приведена карта распределения неоднородностей для случая $\sigma = 12$ м. В отличие от предыдущей модели, здесь распределение имеет более выраженный «мозаичный» характер: отдельные крупные скопления существенно превосходят соседние по размерам, а значительные области зондируемой поверхности остаются сравнительно слабо заполненными.

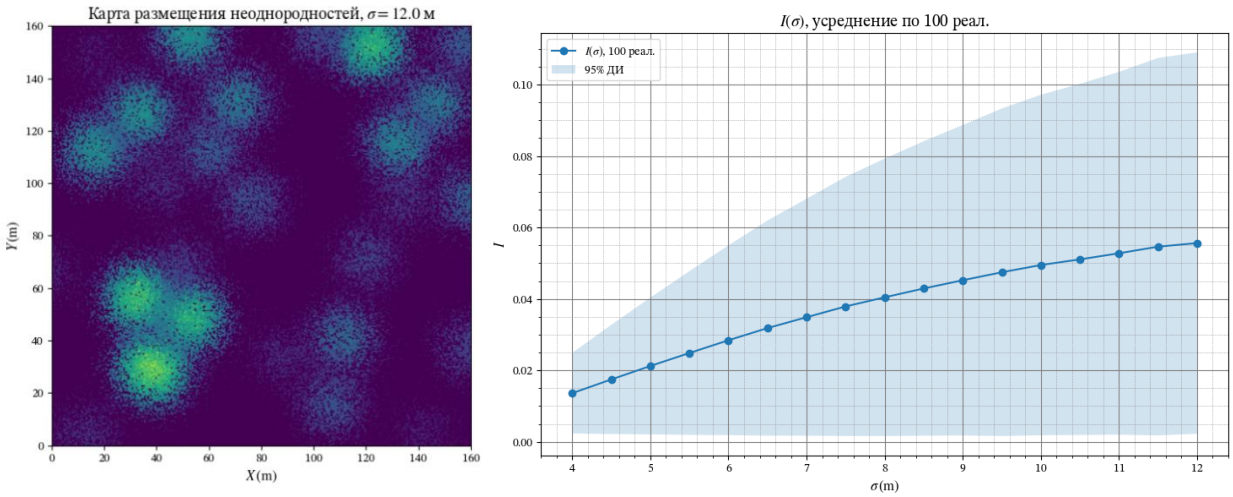


Рис. 4. (а) Карта распределения неоднородностей для модели с отрицательной корреляцией размеров кластеров при $\sigma = 12$ м; (б) зависимость средней интенсивности обратного рассеяния от ширины кластера σ, усредненная по 100 реализациям.

На рисунке 4(б) показана зависимость средней интенсивности обратного рассеяния от ширины кластера σ, усредненная по 100 реализациям. Видно, что интенсивность также возрастает с увеличением σ, однако этот рост выражен слабее, чем в случае гауссовой кластерной модели без корреляции размеров. Кроме того, для данной модели характерен более широкий доверительный интервал, что указывает на больший статистический разброс результатов.

Таким образом, учет отрицательной корреляции между размерами кластеров существенно влияет на характеристики обратно рассеянного сигнала. Даже при близких значениях средней концентрации неоднородностей такая пространственная организация приводит к снижению предсказуемости результатов и усложняет решение обратной задачи акустической диагностики.

4. Сравнение моделей оценки средней концентрации неоднородностей

Проведенное численное исследование показывает, что выбор модели пространственного размещения неоднородностей оказывает существенное влияние на интерпретацию данных акустического зондирования дна. Для случайного распределения наблюдается устойчивая монотонная зависимость средней интенсивности обратного рассеяния от общего числа неоднородностей. В кластерных моделях интенсивность определяется уже не только количеством частиц, но и характером их локальной группировки.

Наибольшую упорядоченность среди рассмотренных вариантов демонстрирует гауссова кластерная модель, в которой рост ширины кластеров сопровождается заметным увеличением средней интенсивности обратного рассеяния. В модели с отрицательной корреляцией размеров кластеров рост интенсивности выражен слабее, а статистический разброс оказывается существенно больше. Это означает, что при решении обратной задачи недостаточно использовать только простую зависимость между средней интенсивностью сигнала и средней поверхностной концентрацией неоднородностей; необходимо учитывать возможную пространственную структуру рассеивателей.

Следовательно, при акустическом мониторинге дна модели размещения дискретных неоднородностей должны рассматриваться как важный элемент интерпретации результатов. Игнорирование коррелированности расположения рассеивателей может приводить к заметной погрешности при оценке средней концентрации донных неоднородностей.

Заключение

В работе рассмотрены три модели пространственного размещения дискретных донных неоднородностей: случайная (некоррелированная) модель, кластерная модель с Гауссовой плотностью распределения и кластерная модель с отрицательной корреляцией размеров кластеров. Показано, что во всех рассмотренных случаях характеристики обратно рассеянного акустического сигнала определяются не только средней поверхностной концентрацией неоднородностей, но и особенностями их пространственного распределения.

Для случайной модели наблюдается монотонный рост средней интенсивности обратного рассеяния с увеличением числа рассеивателей. Для кластерных моделей существенным параметром становится ширина кластера, а также характер взаимной статистической зависимости между скоплениями. Наиболее сильное влияние на устойчивость результатов оказывает отрицательная корреляция размеров кластеров, приводящая к увеличению статистического разброса и усложнению оценки средней концентрации неоднородностей по данным акустического зондирования.

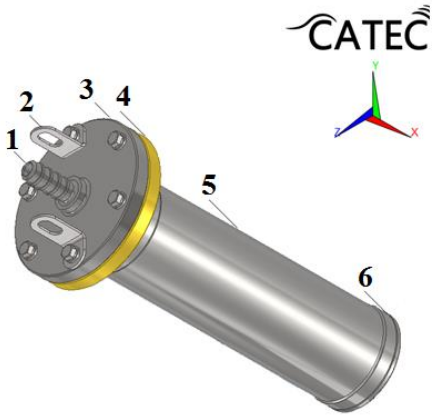
Полученные результаты показывают, что при решении обратной задачи акустической диагностики донных дискретных неоднородностей необходимо учитывать не только суммарное число рассеивателей, но и модель их пространственного размещения, что повышает достоверность оценки средней поверхностной концентрации неоднородностей.

Список литературы

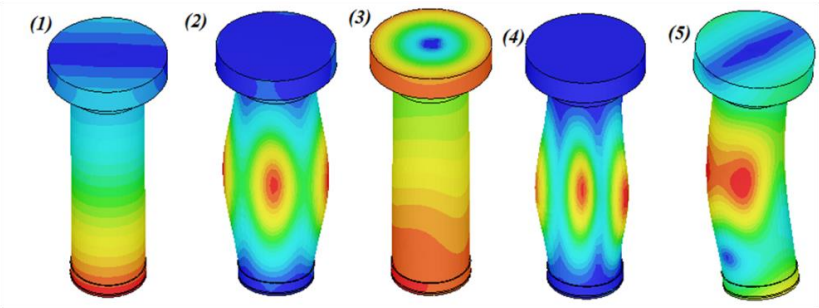
1. Есипов И. Б., Гурбатов С. Н., Малеханов А. М., Петников В. Г. Специальный выпуск, посвящённый 100-летию со дня рождения В. А. Зверева «Некоторые современные проблемы акустики и акустической диагностики» // Акустический журнал. 2025. Т. 71, № 1. С. 6–7.
2. Грязнова И. Ю., Лабутина М. С., Прончатов-Рубцов Н. В. Теория однократного рассеяния волн и её приложение к задачам акустики природных сред. Нижний Новгород: ННГУ им. Н. И. Лобачевского, 2016. С. 19–22.
3. Johnson N., Kotz S., Balakrishnan N. Continuous Multivariate Distributions. Vol. 1: Models and Applications. 2nd ed. New York: Wiley-Interscience, 2000. P. 485–529.
4. Грязнова И. Ю., Ларичев П. А., Сечин Е. М. О различных моделях оценки средней концентрации дискретных донных неоднородностей при дистанционном акустическом зондировании // Труды XXIX Научной конференции по радиофизике, ННГУ. Нижний Новгород, 2025. С. 410–411.

Назад к содержанию секции

СЕКЦИЯ АКУСТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И СТАНДАРТИЗАЦИЯ







назад к Содержанию

СОДЕРЖАНИЕ СЕКЦИИ АКУСТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И СТАНДАРТИЗАЦИЯ

1. РАЗРАБОТКА СКОРОСТНОГО МОДУЛЯ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ДЛЯ ДЕФЕКТОСКОПА ЗЕРКАЛЬНО-ТЕНЕВОГО МЕТОДА НА МНОГОКРАТНЫХ ОТРАЖЕНИЯХ
Петров Г.А., Ашихмин Д.И. 536

2. ОЦЕНКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ НИЗКОЧАСТОТНОГО ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ В БАССЕЙНЕ С МАЛЫМИ ВОЛНОВЫМИ РАЗМЕРАМИ
Дерябин М.С., Бахтин В.К., Вировлянский А.Л., Казарова А.Ю.....542

3. О ВОЗМОЖНОСТИ КАЛИБРОВКИ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ В БАССЕЙНЕ ПРИ ПОМОЩИ ЭФФЕКТА АНОМАЛЬНОЙ ПРОЗРАЧНОСТИ ГРАНИЦЫ ВОДА-ВОЗДУХ
Бахтин В.К., Вировлянский А.Л., Дерябин М.С., Зимина К.Д. Казарова А.Ю., Прохоров А.А. 548

4. ОЦЕНКА УГЛОВЫХ КООРДИНАТ АКУСТИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ С УЧЕТОМ ПРОПУСКОВ В НАБЛЮДЕНИЯХ
Лебедев М.В., Суржиков Г.Ф. 554

5. АКУСТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ
Усачева И.А., Горшонков А.С., Костылев К.А., Салин М.Б. 558

6. О ПОВЫШЕНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ АКУСТИЧЕСКОГО МЕТОДА ДИАГНОСТИКИ СПЛОШНЫХ СРЕД БЕСКОНТАКТНЫМ МЕТОДОМ
Накоряков П.В., Павлов Г.И., Поляев А.В., Гусев А.Л. 565

УДК: 620.179.16 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39536

Разработка скоростного модуля обработки сигналов для дефектоскопа зеркально-теневого метода на многократных отражениях

Д.И. Ашихмин[1,a], Г.А. Петров[2,b]

[1, 2] *Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург 197022, Россия.*

E-mail: [a]2407danil@mail.ru

Аннотация: Рассчитаны и проанализированы временные затраты системы усреднения эхограмм на основе ПЛИС. Проведено сравнение с временными затратами метода обработки данных на персональном компьютере. Определены особенности работы системы на основе ПЛИС.

Ключевые слова: производительность, зеркально-теневой метод, дефектоскопия, сканирование, ПЛИС.

Development of a high-speed signal processing module for a mirror-shadow method flaw detector based on multiple reflections

D.I. Ashihmin[1,a], G.A. Petrov[2,b]

[1, 2] *Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". St. Petersburg 197022, Russia.*

E-mail: : [a]2407danil@mail.ru

Abstract: The time costs of the FPGA-based echogram averaging system have been calculated and analyzed, a comparison with the time costs of the data processing method on a personal computer has been performed, and the operational features of the FPGA-based system have been determined.

Keywords: performance, mirror-shadow method, defectoscopy, scanning, FPGA.

PACS: 06.20.−f

Введение

Для контроля изделий в промышленности широкое распространение получил неразрушающий контроль с использованием элетромагнитно-акустическиих преобразователей (ЭМАП). ЭМАП возбуждают ультразвуковую волну в токопроводящих материалах за счёт взаимодействия переменного магнитного поля катушки с постоянным магнитным полем, создающим силы Ампера на токах Фуко, индуцированных в материале, а

также магнитострикции. Благодаря возможности конструирования датчиков, способных возбуждать ультразвуковую волну на всей боковой поверхности прутка, ЭМАП используют для контроля прутков зеркально-теневым методом на многократных отражениях. Акустический импульс возбуждается на боковой поверхности тела прутка в зоне контроля датчика, распространяется вглубь, проходя диаметр округлого сечения, и многократно отражается от его боковой поверхности. Регистрация отражений импульса от боковой поверхности прутка производится тем же преобразователем. Наличие включений, отклонение формы сечения объекта контроля и другие особенности тела прутка влияют на форму огибающей зарегистрированной серии импульсов. Результатом измерений является амплитуда и время регистрации отражённых импульсов, многократно прошедших через контролируемую часть прутка [1].

Прибор, реализующий зеркально-теневой методом на многократных отражениях, является лабораторная версия дефектоскопа ДЭМА [2], в котором регистрация и обработка данных осуществляется компьютерным блоком, в состав которого входит плата АЦП. На рисунке 1 показана эхограмма, полученная на прутке диаметром 10 мм. Длинна временной оси составляет 0,2 мс. При рассмотрении эхограммы выделяют зондирующий импульс (в ограничении), а также набор эхоимпульсов (донных сигналов). Первые из серии эхоимпульсы скрыты в зоне с помехами от зондирующего импульса. До начала измерений пользователь задает границы регистрируемой эхограммы, по которым производится расчёт целевых параметров.

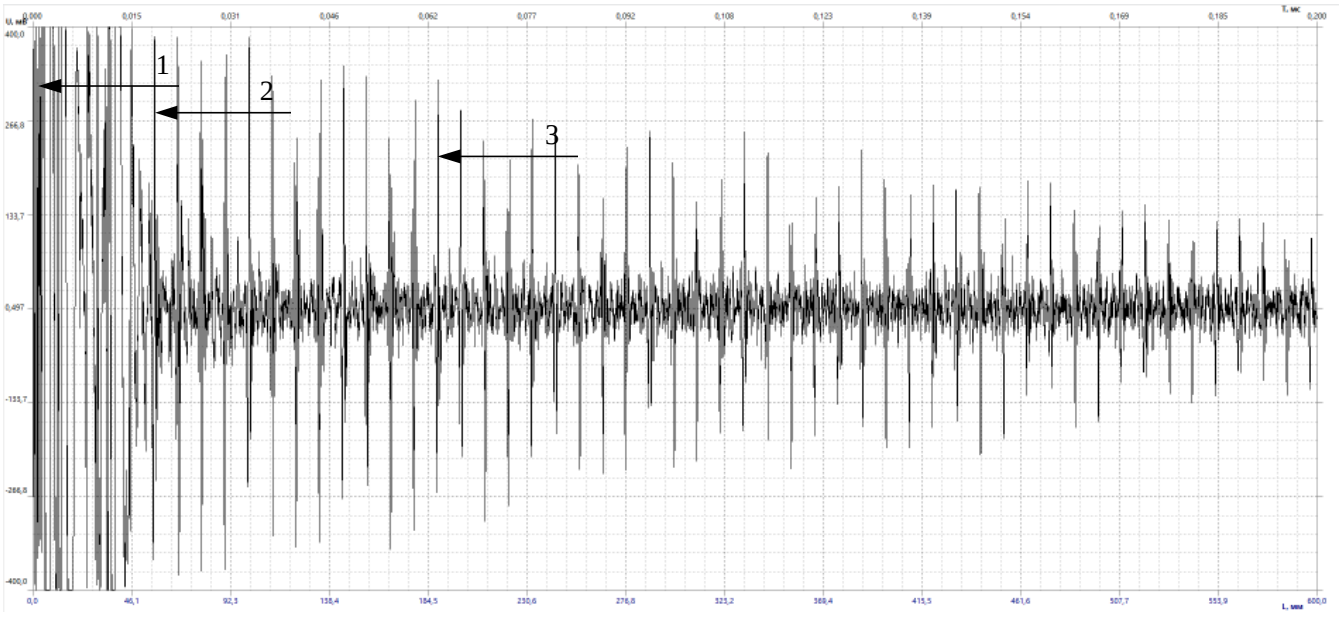


Рисунок 1 – Зарегистрированный сигнал в виде эхограммы, усреднение 32, без фильтрации
1 – зондирующий импульс; 2 – 6-ый донный импульс; 3 – 18-ый донный импульс

Описание эксперимента

В лабораторной установке дефектоскопа ДЭМА временные затраты при обработке данных не позволяют производить контроль на высоких скоростях, из-за чего реализован стенд обработки на основе ПЛИС. Для реализации лабораторных испытания была написана программа в среде разработки Vivado, которая представлена на рисунке 2. В программе реализованы блок генерации, усреднения и перевода в интерфейс AXIstream и два блока ячеек оперативной памяти для параллельного заполнения и непрерывной буферизации измерений [3].

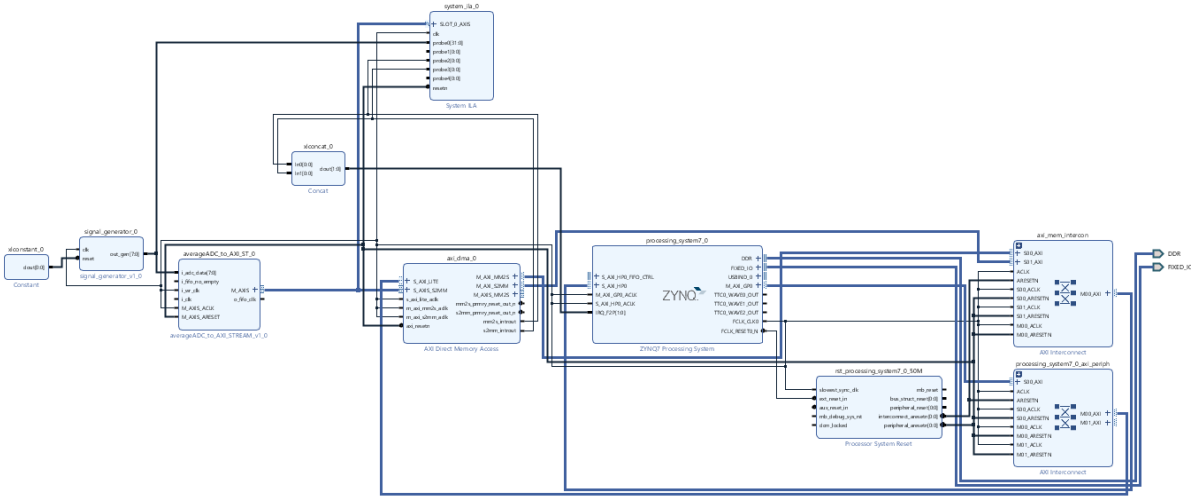


Рисунок 2 – Программа лабораторного стенда в среде Vivado

Результаты измерений фиксируются в виде времени прихода пакетов в секундах, с разрешением 1 мкс в колонке «Time», как показано на рисунке 3.

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
93	0.030219	192.168.0.10	0.0.0.0	UDP	298	40501 → 0 Len=256
94	0.030550	192.168.0.10	0.0.0.0	UDP	298	40501 → 0 Len=256
95	0.030874	192.168.0.10	0.0.0.0	UDP	298	40501 → 0 Len=256
96	0.031204	192.168.0.10	0.0.0.0	UDP	298	40501 → 0 Len=256
97	0.031532	192.168.0.10	0.0.0.0	UDP	298	40501 → 0 Len=256
98	0.031861	192.168.0.10	0.0.0.0	UDP	298	40501 → 0 Len=256
99	0.032189	192.168.0.10	0.0.0.0	UDP	298	40501 → 0 Len=256
100	0.032516	192.168.0.10	0.0.0.0	UDP	298	40501 → 0 Len=256
101	0.032842	192.168.0.10	0.0.0.0	UDP	298	40501 → 0 Len=256
102	0.033169	192.168.0.10	0.0.0.0	UDP	298	40501 → 0 Len=256
103	0.033494	192.168.0.10	0.0.0.0	UDP	298	40501 → 0 Len=256
104	0.033824	192.168.0.10	0.0.0.0	UDP	298	40501 → 0 Len=256
105	0.034152	192.168.0.10	0.0.0.0	UDP	298	40501 → 0 Len=256
106	0.034478	192.168.0.10	0.0.0.0	UDP	298	40501 → 0 Len=256
107	0.034806	192.168.0.10	0.0.0.0	UDP	298	40501 → 0 Len=256
108	0.035082	192.168.0.10	0.0.0.0	UDP	298	40501 → 0 Len=256
109	0.035462	192.168.0.10	0.0.0.0	UDP	298	40501 → 0 Len=256

Рисунок 3 – Окно замера времени прихода пакетов Wireshark

Так как базовой частью временных затрат лабораторной установки являлось усреднение была проведена серия измерений временных затрат на замер эхограмм и их усреднение. При характеристиках регистрируемых данных: частота регистрации данных 100 МГц; разрядность

данных 1 байт; число точек временной реализации 256; усреднения 32, 64 и 128. Также были рассчитаны временные затраты для регистрации подобных данных, без учёта накладных расходов на математическую обработку.

Результаты и их обсуждение

Полученные в ходе измерений временных затрат системы на основе ПЛИС данные сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Зависимость времени кадра от усреднения

Усреднение	Временные затраты регистрации, мкс	
	Среднее зарегистрированное значение	Вычисленное значение
16	40,96	16
32	82	32
64	164	64
128	328	128

Из таблицы видно, что среднее значение совпадает с расчётным, однако его дисперсия может достигать 100%, как видно на рисунке 5. Данное явление может быть связано с пропаданием пакетов, так как используемый протокол UDP обеспечивает передачу дейтаграмм без установления соединения и не гарантирует доставку пакетов [4]. Таким образом, можно заключить об успешной минимизации временных затрат. Однако при рассмотрении комплекса значений времени временные задержки имеют большее значение. При рассмотрении данных, полученных при значении усреднения 128, можно увидеть на рисунке 4.

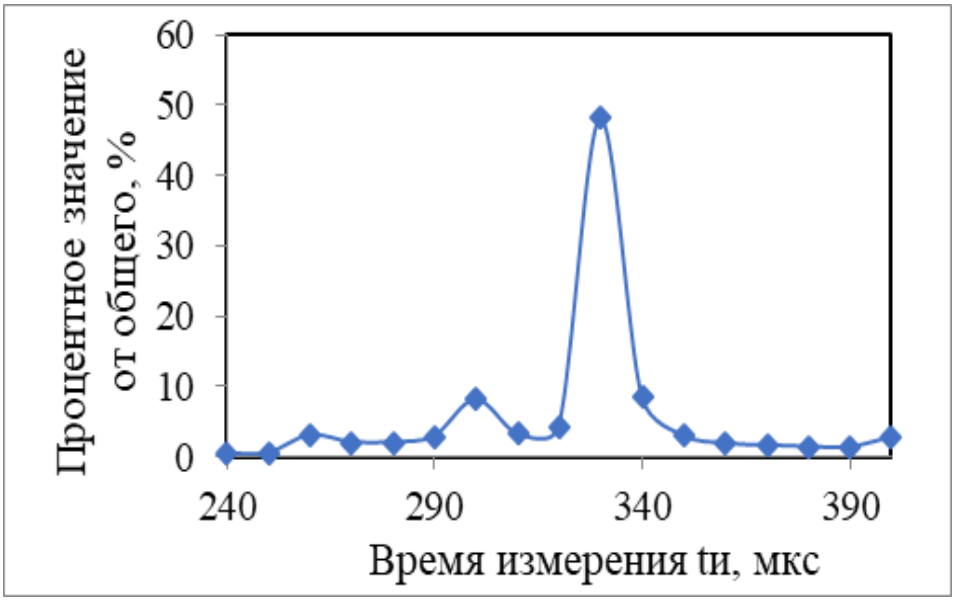


Рисунок 4 – Процентные значения времён регистрации в общем количестве для усреднения 128

При этом повышенные значения времени, ярко выраженные крайним значением на графике показанном на рисунке 4 возникают периодически, как видно по графику на рисунке 5.

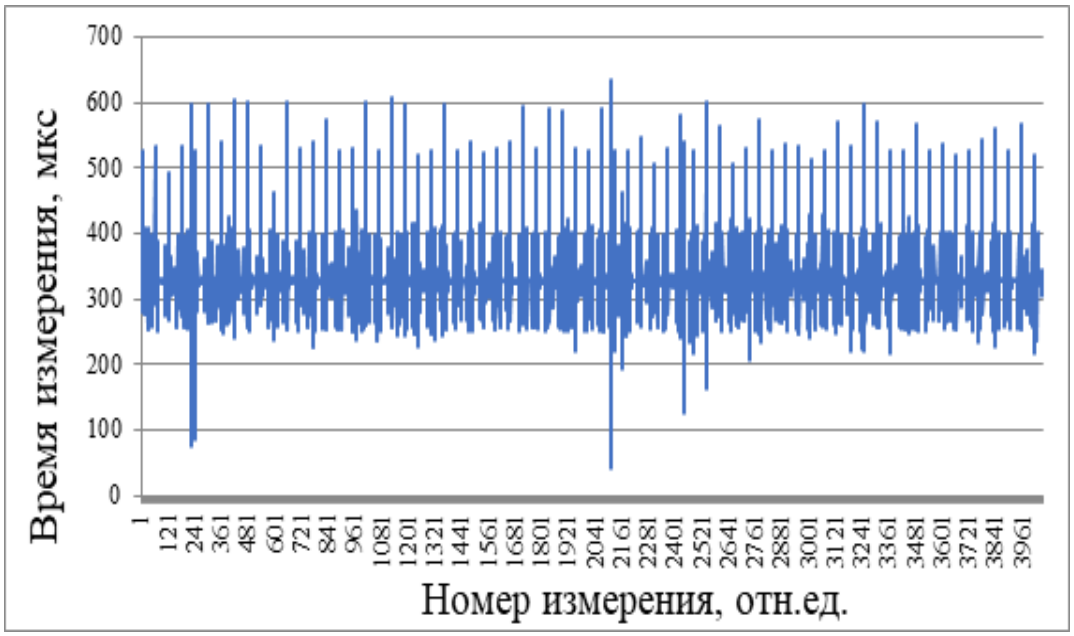


Рисунок 5 – Выборка измерений для усреднения 128

Результирующие временные затраты установки ДЭМА и установки на ПЛИС в сравнении с минимальным теоретическим временем измерений представлены на рисунке 6.

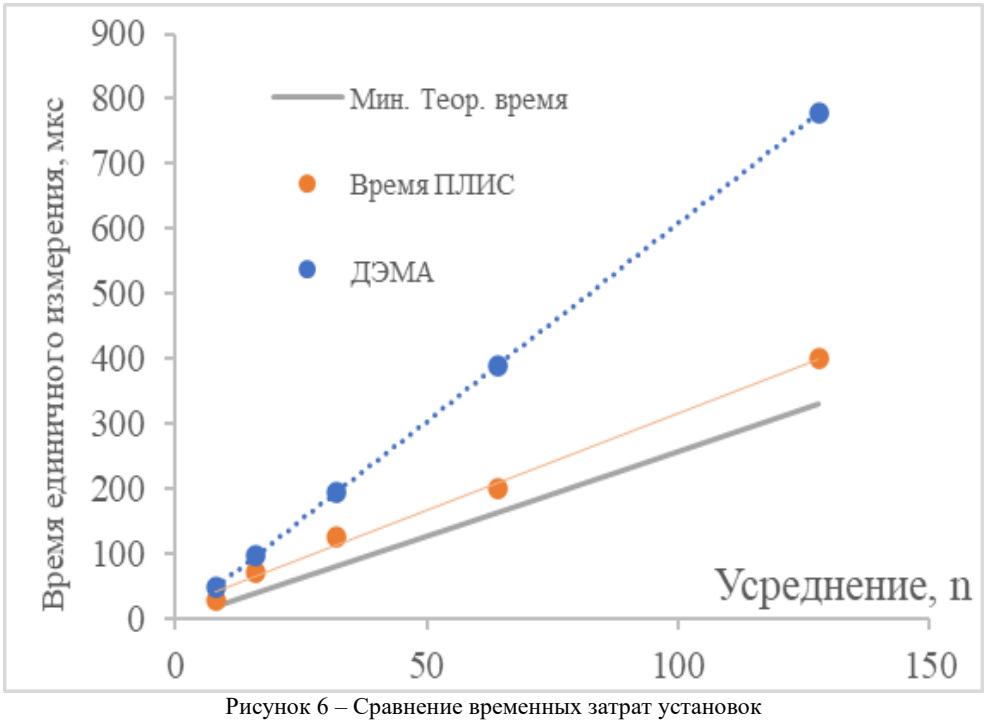


Рисунок 6 – Сравнение временных затрат установок

Результаты сравнения временных затрат демонстрируют успешность оптимизации установки на ПЛИС, однако имеет определённую неравномерность временных затрат в серии измерений.

Заключение

В рамках работы проведена оптимизация временных затрат на обработку сигнала дефектоскопа за счёт внедрения ПЛИС. ПЛИС обеспечивает высокую скорость обработки сигнала. Лабораторный стенд на ПЛИС показал меньшие временные затраты в сравнении с процессорной системой компьютера. По результатам проведённых работ, последующая оптимизация цифрового тракта потребует дополнительной проработки прошивки ПЛИС для исключения периодических задержек пакетов данных.

Список литературы

1. *Муравьева О. В., Злобин Д. В.* Особенности построения аппаратуры электромагнитно-акустической дефектоскопии пруткового проката с использованием стержневых волн. // Вестн. ИжГТУ им. М.Т. Калашникова. 2012. № 4 (56). С. 99—104.
2. Патент на полезную модель № 130082 Российская Федерация, МПК G01N 29/04 (2006.01). Устройство ультразвукового контроля цилиндрических изделий : № 2013111122/10 : заявл. 12.03.2013 : опубл. 10.07.2013, Бюл. № 19 / Муравьев В. В., Муравьева О. В., Захаров В. А.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова». – 6 с. : ил.
3. *Ашихмин, Д. И.* Выбор аппаратной платформы для макетирования высокоскоростного акустического дефектоскопа прутков, реализующего зеркально-теневой метод на многократных отражениях // Приборостроение в XXI веке - 2024. Интеграция науки, образования и производства: Сборник материалов XX Всероссийской научно-технической конференции, Ижевск, 04–06 декабря 2024 года. – Ижевск: ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2025. – С. 70-78.
4. *Ch. Scheibe, A. Kuri, Yu. Feng* et al. Interfacing real-time and offline power system simulation tools using UDP or FPGA systems // Electric Power Systems Research. – 2022. – Vol. 212. – P. 108490. – DOI 10.1016/j.epsr.2022.108490.

УДК: 534.6 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39537

Оценка чувствительности низкочастотного гидроакустического излучателя по измерениям в бассейне с малыми волновыми размерами

М.С. Дерябин[1,2,a], В.К. Бахтин[1,2], А.Л. Вировлянский[1,2], А.Ю. Казарова[1], Д.А. Касьянов[1], А.А. Прохоров[1,2], К.Д. Зимина[1], П.Н. Вьюгин[1,2]

[1] ИПФ РАН. Н.Новгород, ул.Ульянова, 46

[2] ННГУ им. Н.И. Лобачевского. Н.Новгород, пр.Гагарина, 23

E-mail: [a]mmm1984@inbox.ru

Аннотация: В работе приведены результаты эксперимента по оценке чувствительности по напряжению низкочастотного гидроакустического излучателя (НЧИ). Измерения проводились в гидроакустическом бассейне с размерами (м) 6x5x4. Основной частотный рабочий диапазон исследуемого излучателя составляет от 1000 до 2000 Гц. Характерная длина волны в данном частотном диапазоне составляет около 1,5 м, что сопоставимо с размерами самого бассейна. Традиционные методы измерения чувствительности по напряжению НЧИ связаны с проведением работ на акваториях. Эти методы затратны и требуют серьёзного обеспечения. В работе предлагаются альтернативные подходы, позволяющие произвести оценку характеристик НЧИ в ограниченном пространстве. В первую очередь рассматривается метод, основанный на явлении аномальной прозрачности границы раздела вода-воздух для источника звука, расположенного на небольшой глубине. Эта граница играет роль фильтра, предотвращающего проникновение волн, отраженных от боковых стенок и дна, в воздух. Дополнительно в работе приводятся результаты оценки чувствительности преобразователя с использованием подводного акселерометра. Кроме того представлены расчёты, позволяющие оценить эффективность метода. При этом используется разработанная конечно-элементная модель исследуемого НЧИ.

Ключевые слова: низкочастотный гидроакустический излучатель, гидроакустический бассейн, чувствительность по напряжению, метод конечных элементов.

Estimation of the sensitivity of a low-frequency hydroacoustic radiator based on measurements in a small wave dimensions tank

M.S. Deryabin[1,2,a], V.K. Bakhtin[1,2], A.L. Virovlyansky[1,2], A.Yu. Kazarova[1], D.A. Kasyanov[1], A.A. Prokhorov[1,2], K.D. Zimina[1], P.N. Vyugin[1,2]

[1] *Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, 46 Ul'yanov Street, Nizhny Novgorod, Russia*
[2] *N.I. Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, 23 Prospekt Gagarina (Gagarin Avenue), Nizhny Novgorod, Russia*
E-mail: [a]mmm1984@inbox.ru

Abstract: The results of experimental assessment of the voltage sensitivity of a low-frequency hydroacoustic radiator (LFHR) is presented in the paper. The measurements were conducted in a hydroacoustic tank with dimensions (m) 6x5x4. The main frequency range of the radiator is from 1000 to 2000 Hz. The characteristic wavelength in this frequency range is about 1.5 m, which is comparable to the size of the tank. Traditional methods of estimation LFHR voltage sensitivity are based on conducting measurements in water areas. These methods are expensive and require specific equipment. Alternative approaches, proposed in the paper, allow estimating the LFHR free-field characteristics in a confined space. In particular, it considers a method based on the anomalous transparency of the water-air interface for a shallow acoustic source phenomenon. This interface acts as a filter, preventing side- and bottom-reflected waves from entering the air. Additionally, the paper presents the results of evaluating the sensitivity of the radiator using an underwater accelerometer. Presented calculations allow estimating effectiveness of the method. These calculations are based on a developed finite element model of the LFHR.

Keywords: low-frequency hydroacoustic radiator, hydroacoustic tank, voltage sensitivity, finite-element method.

PACS: 43.38.−p

Введение

Традиционные подходы к решению задачи калибровки акустического излучателя в ограниченном пространстве основаны на выделении прямых сигналов, поступающих на приемники без отражения от границ. Существуют два традиционных метода устранения эффекта влияния отраженных от границ сигналов [1, 2]. Один из них заключается в покрытии границ специальными экранами, поглощающими или рассеивающими падающий акустический сигнал. Второй метод основан на технике временной стробирующей фильтрации для разрешения прямых сигналов по времени их прихода. Однако оба метода применимы только на достаточно высоких частотах. Существуют более сложные методы, которые могут быть использованы на акустических частотах ниже пределов, накладываемых

временем отсутствия эхо-сигналов в испытательной камере, см. например [3]. В данной работе с помощью поставленного эксперимента в гидроакустическом бассейне демонстрируются возможности метода оценки электроакустических характеристик НЧИ, основанного на эффекте аномальной прозрачности границы раздела вода воздух [4]. Метод основан на предположении, что граница раздела вода-воздух эффективно пропускает только акустические сигналы, распространяющиеся напрямую от источника к поверхности воды, но практически не пропускает сигналы, отраженные от дна и боковых стенок [5]. Данное предположение справедливо, когда излучатель располагается на глубинах, которые меньше длины волны.

Дополнительно в работе также приведены некоторые результаты эксперимента по оценке чувствительности преобразователя с применением подводного акселерометра. Используя разработанную конечно-элементную модель исследуемого НЧИ, по измерениям, выполненным акселерометром в гидроакустическом бассейне, можно провести расчет ожидаемых характеристик гидроакустического преобразователя.

1 Описание эксперимента

Эксперимент проводился в два основных этапа. На первом этапе измерения выполнялись в воде с помощью измерительного гидрофона и подводного акселерометра. На втором этапе с помощью измерительного микрофона регистрировались сигналы, прошедшие из воды в воздух. Блок-схема экспериментальных установок для первого этапа приведена на рис. 1, а. Блок-схема экспериментальных установок для второго этапа приведена на рис. 1, б.

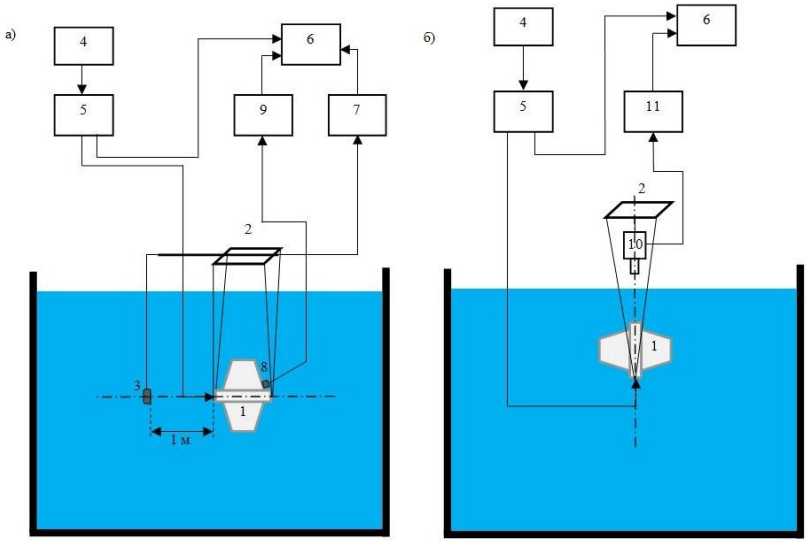


Рис. 1 Блок-схема экспериментальной установки.

Исследуемый в работе излучатель *1* имеет характерный размер 30 см. Основными элементами конструкции излучателя являются: пакетный преобразователь, состоявший из пьезокерамических элементов и стальная оболочка, в которую устанавливается пакетный

преобразователь. Форма оболочки представляет собой два усеченных конуса, имеющих общее основание, образующее плоскость симметрии. Излучатель имеет характерный диапазон частот от 1 до 2 кГц, в котором его волновой размер существенно меньше длины излучаемых волн. Для удобства работы излучатель устанавливают в специальную оснастку *2*, позволяющую работать с НЧИ вместе с измерительным гидрофоном *3*. При проведении измерений с помощью гидрофона излучатель устанавливался в центре бассейна имеющего размеры (м) 6x5x4. Для формирования электрических сигналов использовался генератор сигналов произвольной формы *4* Tektronix AFG 3102. Формируемый сигнал усиливался усилителем мощности *5* У7-5 и подавался на НЧИ. В качестве накачки использовались тональные сигналы в исследуемом диапазоне частот, радио импульсы и ЛЧМ - сигналы. Сигнал накачки контролировался с помощью осциллографа *6* Tektronix DPO4034B и составлял по амплитуде для всех экспериментов 10 В.

Измерительный гидрофон *3* крепился с помощью штанги, входящей в состав оснастки для НЧИ, и находился на расстоянии 1 м от центра НЧИ в плоскости образованной усеченными конусами оболочки излучателя (плоскости симметрии). Измерительный гидрофон использовался совместно с усилителем заряда *7* B&K2690, в который вносились паспортные данные о калибровке гидрофона. Сигнал с усилителя заряда подавался на осциллограф.

Измерительный подводный акселерометр *8* GTLab 1V701TA-100 устанавливался на оболочку НЧИ с помощью специального магнита. Место установки датчика находится вблизи основания усеченного конуса (см. рис. 1, а) и выбрано из соображений наибольшей величины ускорения на поверхности НЧИ. Измерительный акселерометр использовался совместно с формирователем сигнала *9* GTLab A002, с которого сигнал подавался на осциллограф.

При измерениях акустического сигнала через границу раздела вода-воздух излучатель устанавливался таким образом, чтобы его плоскость симметрии была перпендикулярна поверхности воды. Излучатель размещался на глубинах 200, 205 и 300 мм отсчитываемых от центра излучателя. Измерительный конденсаторный полудюймовый микрофон *10* B&K4189 подвешивался над поверхностью воды так, чтобы его апертура была направлена к поверхности воды. Расстояние между апертурой микрофона и поверхностью воды составляло 20, 30, 95 и 500 мм. Измерительный микрофон использовался совместно с усилителем заряда *11* B&K2690 (микрофонный), в который вносились паспортные данные о калибровке микрофона. Сигнал с усилителя заряда подавался на осциллограф.

2 Обсуждение результатов

Оценка чувствительности исследуемого излучателя по измерениям с помощью

подводного акселерометра делалась с применением разработанной конечно-элементной модели исследуемого НЧИ. Численная модель НЧИ позволяет сопоставить ускорение, измеряемое в конкретном месте на поверхности излучателя, с уровнем акустического давления создаваемым излучателем на расстоянии 1 м в водной среде. Таким образом, используя модельные представления, можно сделать оценку чувствительности НЧИ по напряжению, основываясь на результатах измерений с помощью акселерометра. На рис. 2а приведены результаты эксперимента с использованием акселерометра. На графике приведена чувствительность излучателя по напряжению, полученная по результатам измерений с помощью акселерометра: I – излучения сигналов в форме радиоимпульсов, II – излучения сигналов в непрерывном режиме. Непрерывной линией (III) на графике приведены результаты натурных измерений на глубине 7 м проведенных на Горьковском водохранилище, которые рассматриваются в работе как наиболее достоверные. Прерывистой линией (IV) на графике приведены результаты, полученные с помощью численной модели.

На рис. 2, б сплошной линией (i) приведены результаты расчета чувствительности излучателя по напряжению, рассчитанной с помощью метода основанного на пространственной фильтрации акустических сигналов границей раздела вода воздух [5],

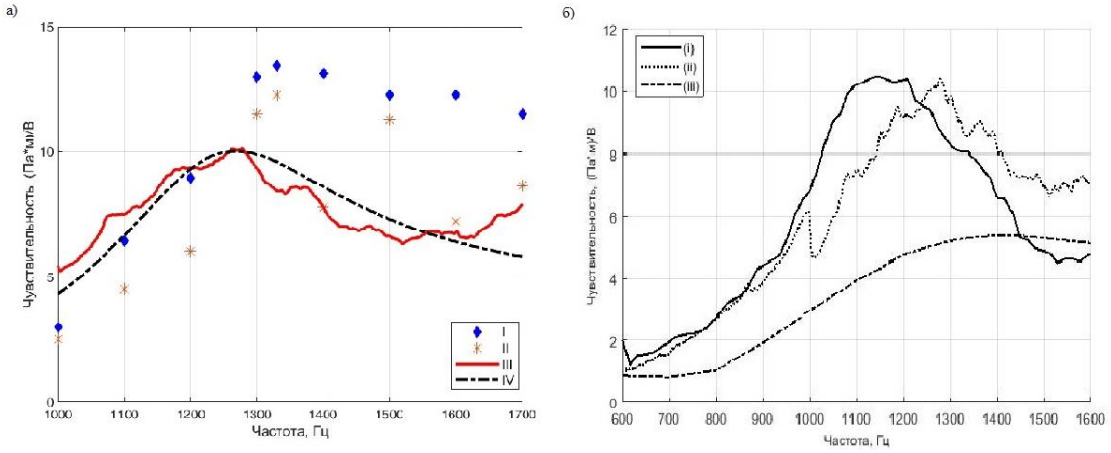


Рис. 2 Чувствительность излучателя по напряжению полученная с помощью:

а) I – импульсных сигналов, II – тональных сигналов, III – натурных измерений, IV – результатов моделирования;

б) i – метода основанного на пространственной фильтрации акустических сигналов границей раздела вода воздух, ii – натурных измерений, iii – гидрофона в бассейне.

использующего результаты измерений акустического поля в воздухе с помощью микрофона. Прерывистой линией (ii) на рис. 2, б приведены результаты натурных измерений. Линией (iii) на рис. 2, б приведены результаты оценки чувствительности излучателя по напряжению, сделанные по измерениям с помощью гидрофона в бассейне. Данные измерения выполнялись в импульсном режиме и основывались на выделении по времени прямого сигнала от излучателя к гидрофону.

Результаты, приведенные на рис. 2, а, говорят о том, что с помощью измерений, выполненных акселерометром, имея численную модель излучателя, реально сделать

приемлемую оценку чувствительности НЧИ по напряжению. Расхождения оценки с результатами прямых натурных измерений составляет 20-30 % по чувствительности и не превышает 5 % по точности определения резонансной частоты.

Результаты, приведенные на рис. 2, б, показывают, что применённый для данных оценок, метод дает хорошее количественное и качественное соответствие данным, полученным при натурных испытаниях. Можно отметить, что оценка, выполненная по измерениям в воздухе, дает несколько заниженное значение резонансной частоты НЧИ, что, по-видимому, связано с тем, что рассматриваемый излучатель не в полной мере можно рассматривать как точечный источник излучения. Тем не менее, ошибка по определению частоты резонанса не превысила 10 %. Оценка чувствительности, сделанная с помощью гидрофона, ожидаемо дает заниженное значение чувствительности по сравнению с натурными измерениями, что связано с необходимостью работать в бассейне с малой длительностью импульсов. Из-за добротности излучателя используемой длительности импульсов недостаточно для излучения максимальной амплитуды сигналов. Проводить измерения при больших длительностях сигналов не позволяют размеры используемого гидроакустического бассейна.

Заключение

Описанный в работе эксперимент продемонстрировал работоспособность методов оценки чувствительности исследуемого НЧИ основанных, как на применении подводного акселерометра при наличии численной конечно-элементной модели, так и при использовании границы раздела вода-воздух в качестве пространственного фильтра. К достоинствам методов можно отнести возможность работы в ограниченном пространстве.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН.

Список литературы

[1] *R.J. Bobber*. Underwater electroacoustic measurement. CA: Peninsula Press, Los Altos, 1988.

[2] *S.P. Robinson*. Review of methods for low frequency transducer calibration in reverberant tanks. npl report cmam 034, 1999.

[3] *A.L. Virovlyansky, M.S. Deryabin*. On the use of the equivalent source method for free-field calibration of an radiator in a reverberant tank. // J. Sound Vibr., **455** (2019) 69-81.

[4] *Oleg A Godin*. Anomalous transparency of water-air interface for low-frequency sound. // Phys. Rev. Let., **97** (2006) 164301.

[5] *A.L. Virovlyansky, M.S. Deryabin, A.A. Prokhorov, A.Yu. Kazarova, V.K. Bakhtin*. Testing a hydroacoustic radiator in a reverberant tank based on recording the sound field in the air above the tank // Preprint, arXiv:2603.13899.

УДК: 534.6.08 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39538

О возможности калибровки гидроакустического излучателя в бассейне при помощи эффекта аномальной прозрачности границы вода-воздух

В. К. Бахтин[1,2,a], А. Л. Вировлянский[1,2], М. С. Дерябин[1,2], К. Д. Зимина[1], А. Ю. Казарова[1], А. А. Прохоров[1,2].

[1] ИПФ РАН. Н.Новгород, ул.Ульянова, 46

[2] ННГУ им. Н.И. Лобачевского. Н.Новгород, пр.Гагарина, 23

E-mail: [a]bakhtin@ipfran.ru

Аннотация: Обсуждается метод калибровки монопольного источника звука в водном бассейне с отражающими боковыми стенками и дном. Метод основан на эффекте аномальной прозрачности границы вода – воздух для источника звука, расположенного на глубине, меньшей или равной излучаемой длине волны в воздухе. Данная граница играет роль фильтра, который пропускает в воздух только прямой сигнал, удерживая в бассейне отраженные сигналы. Поле в воздухе будет почти таким же, как и в случае, когда источник находится на той же малой глубине в однородном водном полупространстве. Это поле описывается известной аналитической формулой, которая позволяет оценить мощность излучения в воду по уровню интенсивности звука, измеренного в воздухе.

Ключевые слова: акустический излучатель, калибровка, граница вода-воздух.

Some peculiarities of hydroacoustic source calibration in reverberant tank based on anomaly transparency of water-air interface

V. K. Bakhtin[1,2,a], A. L. Virovlyansky[1,2], M. S. Deryabin[1,2], K. D. Zimina[1], A. Yu. Kazarova[1], A. A. Prokhorov[1,2].

[1] *Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, 46 Ul'yanov Street, Nizhny Novgorod, Russia*

[2] *N.I. Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, 23 Prospekt Gagarina (Gagarin Avenue), Nizhny Novgorod, Russia*

E-mail: [a]bakhtin@ipfran.ru

Abstract: *A method of a monopole acoustic source calibration in a water tank with reflecting side and bottom boundaries is discussed in the paper. The method is based on anomaly transparency effect of water-air boundary for shallow acoustic source (source depth is equal to or less than a radiating wavelength in air). This boundary has a role of a filter transmitting direct wave and preventing reflected wave from leaving the tank. The acoustic field in the air should be almost the same as for that shallow acoustic source in homogeneous water half-space.*

This acoustic field is described by a well-known analytic equation, which allows estimating water radiation power by sound intensity in the air.

Keywords: acoustic source, free-field calibration, water-air interface.

PACS: 43.58.Vb

Введение

Рассматривается метод калибровки монопольного источника, основанный на измерениях акустического поля, которое этот источник излучает из бассейна в воздух. Известно, что граница раздела между полупространствами воды и воздуха для плоских волн является практически абсолютно отражающей [1]. Однако при расположении источника в воде на небольшой глубине возникает эффект аномальной прозрачности границы [2]. Предполагается, что размер источника мал по сравнению с длиной волны, а возбуждаемое им поле представляет собой суперпозицию плоских и неоднородных (затухающих) волн. Вблизи источника преобладают последние, однако их амплитуды экспоненциально убывают с расстоянием. Если глубина источника мала по сравнению с длиной волны, амплитуды значительной части неоднородных волн на пути до границы не успевают заметно ослабнуть, а после пересечения границы эти волны становятся распространяющимися. При этом коэффициент прохождения через границу раздела по энергии оказывается до 3400 раз больше, чем для того же самого источника, находящегося на глубине равной или более длины волны [3].

Мы рассматриваем ситуацию, когда звуковое поле в воздухе над акустическим монополем, находящимся на небольшой глубине в бассейне, приближенно описывается известным аналитическим выражением для поля над монополем в водном полупространстве [2, 3]. Использование этого соотношения позволяет оценить уровень звукового давления источника в воде по измерениям звукового поля в воздухе [6].

1 Постановка задачи

Рассмотрим ситуацию, когда точечный тональный источник, находящийся в водном полупространстве, возбуждает звуковую волну в расположенном над водой воздушном полупространстве. Введем цилиндрическую систему координат (r,φ,z) с вертикальной осью z, направленной вверх. Полагаем, что горизонтальная плоскость $z=0$ совпадает с границей раздела воды и воздуха. Воздушное $(z>0)$ и водное $(z<0)$ полупространства считаем однородными с плотностями $\rho_a=1.012\,кг/м^3$ и $\rho_w=1000\,кг/м^3$ и скоростями звука $c_a=343\,м/с$ и $c_w=1470\,м/с$, соответственно. Источник, находящийся в точке с координатами $r=0$ и $z=-z_s$, где $z_s>0$, возбуждает звуковое поле на угловой частоте ω.

Поле не зависит от азимутального угла φ. Поле такого источника в воздухе описывается известным выражением [2 – 4]:

$$p(r,z) = 2im\int_0^\infty \frac{qdq}{m\gamma_w(q)+\gamma_a(q)} J_0(qr)\exp\left(i\gamma_a(q)z + i\gamma_w(q)z_s\right), z>0, \quad (1)$$

где: $\gamma_a(q) = \sqrt{\left(\frac{\omega}{c_a}\right)^2 - q^2}; \gamma_w(q) = \sqrt{\left(\frac{\omega}{c_w}\right)^2 - q^2}$; q – горизонтальное волновое число; $J_0(qr)$ – функция Бесселя первого рода нулевого порядка.

Компоненты возбужденного в воде поля, отвечающие волновым числам $q<k_w$, описывают однородные волны, а компоненты с $q>k_w$ неоднородные волны, которые экспоненциально затухают при удалении от источника. После прохождения границы вода – воздух неоднородные волны с q из интервала $k_w<q<k_a$ становятся распространяющимися. Волны с $q>k_a$ в воздухе не распространяются. Ослабление неоднородной волны на пути от источника до границы определяется множителем $exp\left(-z_s\sqrt{\left|k_w^2-q^2\right|}\right)$ и оно тем значительнее, чем больше глубина источника. Для $z_s>\lambda_w$, где $\lambda_w = 2\pi/k_w$ – длина волны в воде, амплитуды неоднородных волн у границы пренебрежимо малы. При этом эффективный интервал интегрирования в (1) простирается от 0 до k_w. С уменьшением глубины источника появляются неоднородные волны, которые не успевают заметно ослабнуть и дают дополнительный вклад в звуковое поле в воздухе. При выполнении условия $z_s\sqrt{k_a^2-k_w^2}$ □ 1 верхняя граница эффективного интервала интегрирования в (1) увеличивается до максимально возможного значения k_a. Учитывая, что $k_a, \cong 4,3k_w$, перепишем неравенство выше в следующем виде:

$$z_s \square \lambda_a, \lambda_a = 2\pi/k_a \quad (2)$$

2 Эксперимент

В данном разделе описаны результаты применения обсуждаемого подхода для калибровки монопольных акустических источников в интервале частот 5-20 кГц. Калибровались два обратимых гидрофона B&K Type 8100 и B&K Type 8103 (рис. 1). В однородном водном пространстве каждый из этих источников на частотах из указанного интервала возбуждает поле, которое приближенно описывается выражением $p_0 exp(ik_w R)/R$, где R – расстояние от точки наблюдения, а p_0 задает давление на расстоянии

1 м от источника. Задачей калибровки была оценка $|p_0|$, отвечающей амплитуде приложенного к источнику напряжения 1 В.

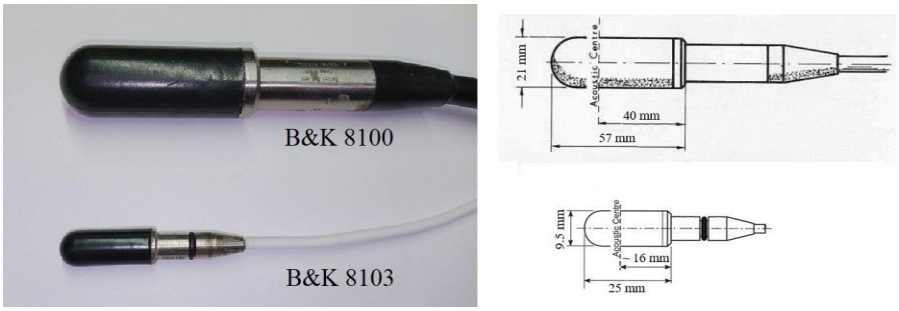


Рис. 1. Внешний вид калибруемых гидрофонов и расположение их акустических центров

Бассейн, в котором выполнялись измерения, представлял собой куб размера 1x1x1 м со свободной поверхностью и боковыми стенками и дном, выполненными из органического стекла. Схема измерений показана на рис. 2 (левая часть).

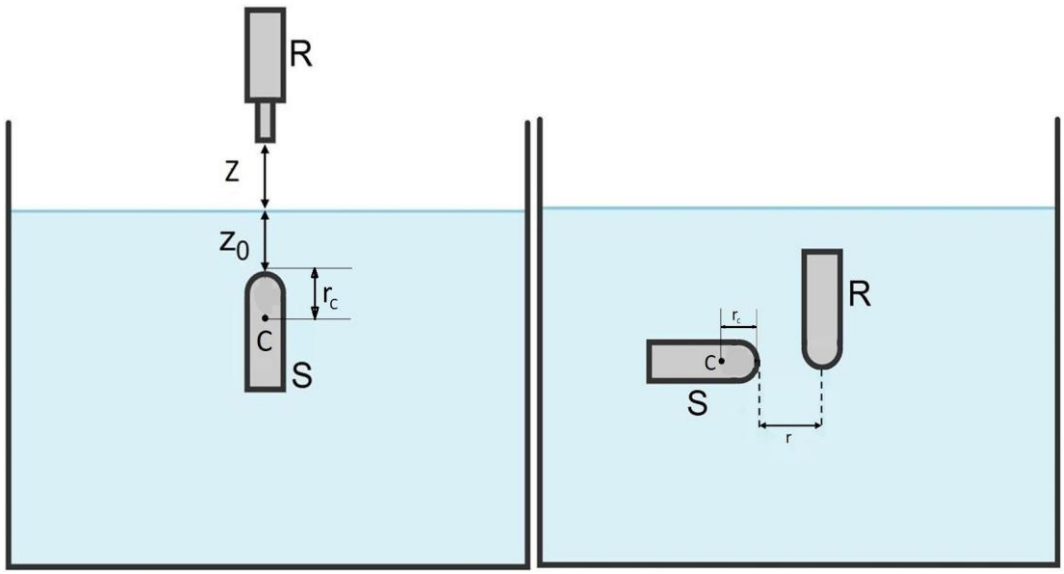


Рис. 2. Схема измерений

Источник S, расположенный в воде на глубине z_0, излучает тональный сигнал на частоте f, который регистрируется в воздухе на высоте z микрофоном R. Акустический центр источника находится в точке C, глубина которой равна $z_0 + r_c$. Пусть $P_m(f)$ – амплитуда зарегистрированного микрофоном давления в воздухе на высоте z над источником, а $P(f)$ – амплитуда давления на частоте f в точке $(0, z)$, рассчитанного по формуле (1) для точечного источника на глубине $z_s = z_0 + r_c$. Согласно нашему предположению, при малом z_0 искомая оценка $|p_0|$ имеет вид

$$|p_0| = \frac{P_m(f)}{P(f)} \qquad (3)$$

Оба источника помещались на глубину $z_0 = 1см$. При расчетах использованы указанные в документации производителя [5] значения r_c: 1,7 см для B&K 8100 и 0,9 см для B&K 8103 (см. рис. 1).

На рис. 3 тонкие сплошные линии показывают частотные зависимость уровня звукового давления (SPL)

$$SPL = 20log_{10}\left(\frac{|p_0|}{10^{-6}\,Па}\right) \qquad (4)$$

найденные с использованием соотношения (3) для источников B&K 8100 и B&K 8103 соответственно.

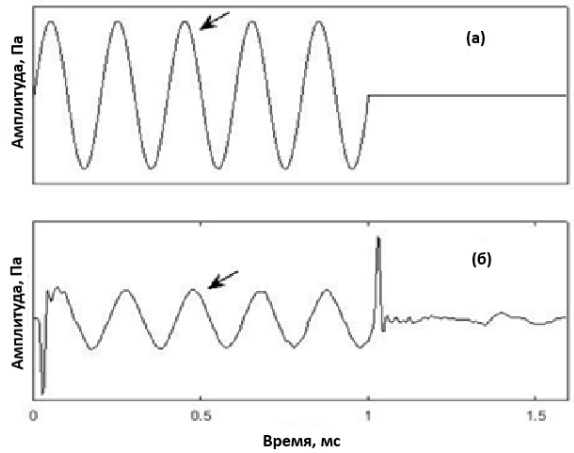


Рис. 3. Излученный и принятый сигналы

Звездочками на рис. 4 показаны результаты альтернативной оценки SPL на частотах 5, 6,...,20 кГц, выполненной на основе измерений поля источника в воде. Схема измерений показана на рис. 2 (правая часть). Источник *S* излучает сигнал s_0, состоящий из пяти периодов несущей частоты. Он регистрируется приемным гидрофоном R, расположенным на расстоянии r от края источника. Источник и приемник находятся в центре бассейна, расстояние r варьируется от 5 до 50 мм с шагом 5 мм. На рис. 3 показаны примеры излученного (а) и принятого (б) сигналов. Для оценки $|p_0|$ используется зависимость величины третьего максимума сигнала p_3, отмеченного стрелкой, от расстояния r. Предполагается, что

$$|p_3| = \frac{|p_0|}{r + r_c} \qquad (5)$$

Искомую оценку дает величина $|p_0|$, для которой функция в правой части лучше всего аппроксимирует последовательность измеренных значений $|p_3|$.

Жирные сплошные линии на рис. 4 представляют значения SPL полученные из предоставляемой производителем документации [5].

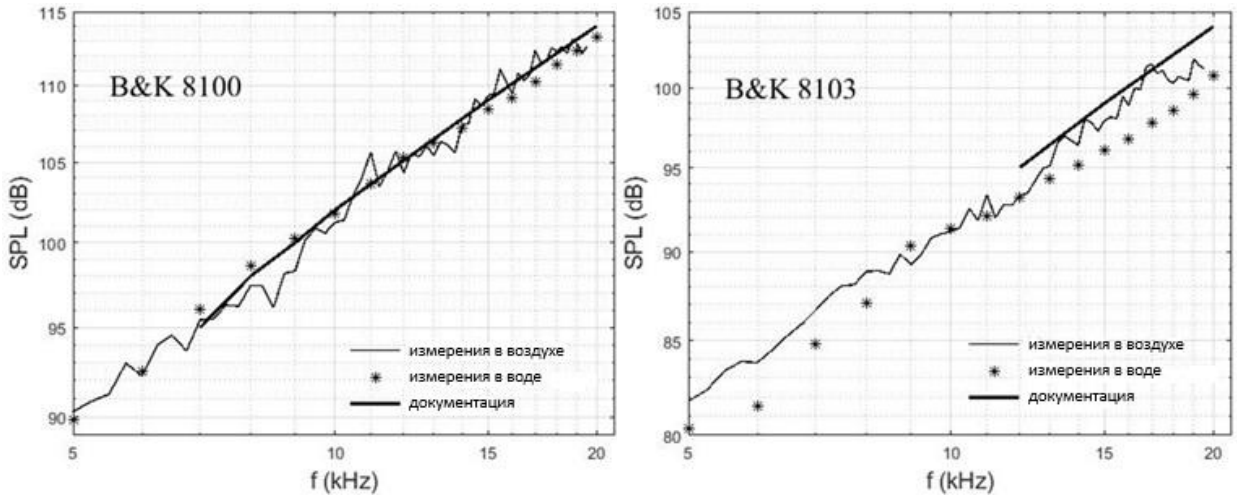


Рис. 4. Результаты калибровки

Заключение

Представленные на рис. 4 результаты сравнения оценок SPL, полученных разными методами, демонстрируют работоспособность рассматриваемого подхода. Они подтверждают, что граница вода — воздух действительно может играть роль фильтра, который пропускает в воздух волны, излученные источником, находящегося на глубине менее одной длины волны, вверх, то есть в направлении на приемник, и задерживать внутри бассейна волны, отраженные от стенок и дна.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН (проект FFUF-2024-0041).

Список литературы

[1] *David M.F.* Chapman and Peter D Ward. The normal-mode theory of air- to-water sound transmission in the ocean. // The Journal of the Acoustical Society of America, **87** (1990), p. 601-618.

[2] *Oleg A. Godin.* Anomalous transparency of water-air interface for low- frequency sound // Physical review letters, **97** (2006), 164301.

[3] *Oleg A. Godin.* Sound transmission through water air interfaces: New insights into an old problem // Contemporary Physics, **49** (2008), p. 105-123.

[4] *Глушков Е.В., Глушкова Н.В., Годин О.А.* Эффект аномальной прозрачности границы вода–воздух для объемного излучателя // Акустический журнал, **59** (2013), с. 8-18

[5] https://www.elektroakustika.cz/images/bruel_kjaer/skenovat0017.pdf [Accessed: 22 October 2025].

[6] *A.L. Virovlyansky, M.S. Deryabin, A.A. Prokhorov, A.Yu. Kazarova, V.K. Bakhtin*. Testing a hydroacoustic radiator in a reverberant tank based on recording the sound field in the air above the tank // arXiv:2603.13899

УДК:621.391.26 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39539

Оценка угловых координат акустических источников с учетом пропусков в наблюдениях

М.В. Лебедев[1,2,a], Г.Ф. Суржиков[2,b]

[1]*АО "АКИН". Шверника 4. 117292, Москва*

[2] *Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет).*

г. *Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, 125993*

E-mail: [a]max_lebedev@akin.ru, [b]gfsurzhikov@gmail.com

Аннотация: В настоящей работе рассматривается задача определения угловых координат акустических источников при наличии пропусков в наблюдаемых сигналах с распределенных в пространстве сенсоров. Сформулирована стохастическая модель этих сигналов. В ней предполагается, что полезный сигнал и шум являются случайными и гауссовскими. Для учета пропусков в данных в эту модель введены скрытые переменные. В работе для рассматриваемой модели наблюдений разработан алгоритм поиска угловых координат. Этот метод основан на EM-алгоритме. Также приведены результаты численных экспериментов для различных условий работы рассматриваемой системы акустических наблюдений.

Ключевые слова: EM-алгоритм, байесовское оценивание с пропусками, линейная антенная решетка, оценка максимального правдоподобия

ESTIMATION OF ANGULAR COORDINATES OF ACOUSTIC SOURCES TAKING INTO ACCOUNT GAPS IN OBSERVATIONS

M.V. Lebedev[1,2,a], G.F. Surzhikov[2,b]

[1]*AO "AKIN". Moscow, Shvernika 4, 117292, Russia.*

[2]*Moscow Aviation Institute (National Research University). Moscow Volokolamskoe shosse, 4, 125993 Russia.*

E-mail: [a]max_lebedev@akin.ru, [b]gfsurzhikov@gmail.com

Abstract: This paper examines the problem of determining the angular coordinates of acoustic sources in the presence of gaps in the observed signals from spatially distributed sensors. A stochastic model of these signals is formulated. It assumes that the useful signal and noise are random and Gaussian.

сигналы рассматриваются в качестве скрытых переменных, данный алгоритм развивает идеи, предложенные в [4].

1 Описание модели наблюдения

1.1 Модель наблюдений

Матрица принятых сигналов (наблюдений) X с элементов антенной решетки является результатом следующей модели наблюдений:

$$X = \mathbf{A}(\theta)S + N,$$

где

$$X = [X_1, \dots, X_T], S = [S_1, \dots, S_T], N = [N_1, \dots, N_T],$$

и $X_t \in \mathbb{C}^L, S_t \in \mathbb{C}^K, N_t \in \mathbb{C}^L$ – векторы-столбцы, соответствующие наблюдениям, сигналам и шумам в момент времени $t = 1, \dots, T$, $\mathbf{A}(\theta)$ – матрица задержек в комплексной области на элементах линейной равномерной антенной решетки размера $L \times K$ от приходящих на них плоских волн:

$$\mathbf{A}(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ e^{-2i\pi\frac{\mathrm{d}}{\lambda}\sin(\theta_1)} & e^{-2i\pi\frac{\mathrm{d}}{\lambda}\sin(\theta_2)} & \dots & e^{-2i\pi\frac{\mathrm{d}}{\lambda}\sin(\theta_K)} \\ \dots & \dots & \ddots & \vdots \\ e^{-2i\pi(L-1)\frac{\mathrm{d}}{\lambda}\sin(\theta_1)} & e^{-2i\pi(L-1)\frac{\mathrm{d}}{\lambda}\sin(\theta_2)} & \dots & e^{-2i\pi(L-1)\frac{\mathrm{d}}{\lambda}\sin(\theta_K)} \end{bmatrix},$$

1.2 Описание пропусков в данных

Через $x = [x_1, \dots, x_T]$ будем обозначать реализацию случайной матрицы $X = [X_1, \dots, X_T]$. Для каждого момента времени $t = 1, \dots, T$ определено непустое множество индексов, соответствующих доступным (для наблюдения) компонентам вектора X_t: $o_t \subseteq \{1, \dots, L\}$, $1 \leq |o_t| \leq L$, и множество индексов, соответствующих пропускам в векторе X_t: $m_t \subset \{1, \dots, L\}$, причем $o_t \cup m_t = \{1, \dots, L\}$, $o_t \cap m_t = \varnothing$, $\forall t \in \{1, \dots, T\}$. Доступная и недоступная части вектора X_t обозначаются через $X_{t,o_t} = ((X_t)_i)_{i \in o_t} \in \mathbb{C}\mathrm{C}^{|o_t|}$ и $X_{t,m_t} = ((X_t)_i)_{i \in m_t} \in \mathbb{C}\mathrm{C}^{|m_t|}$ соответственно. Таким образом, будем считать, что набор наблюдений X состоит из доступной части $X_o = \{X_{t,o_t}\}_{t=1}^T$ и недоступной: $X_m = \{X_{t,m_t}\}_{t=1}^T$. Индексы с пропусками заранее известны.

Параметры источников сигналов	
Частота	1000 Гц
Длина волны	1.5 м
Расстояние до источника	32 000 м

Таблица 2

Угловые координаты и отношение сигнал-шум для третьего примера

	Источник №1	**Источник №2**
Угловые координаты	$\theta = [-0.5]$ $\approx [-28.6479°]$	$\theta = [1.1]$ $\approx [63.0254°]$
Отношение дисперсии сигнала и средней дисперсии шума на приемном элементе антенны	0.46688	0.78903

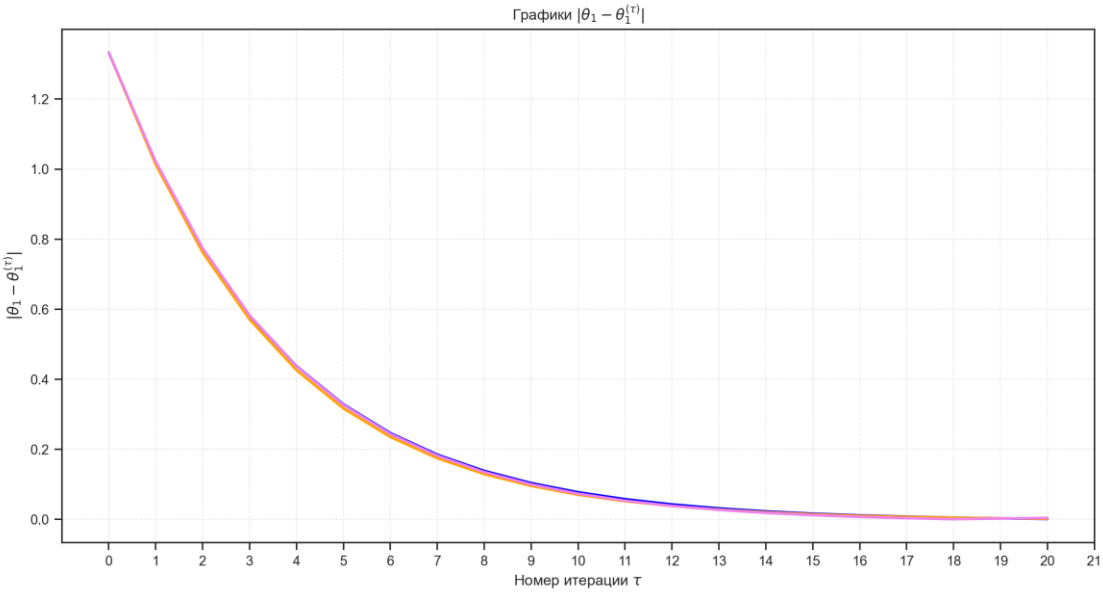


Рис.1 График ошибки оценивания угловой координаты θ_1

видно, что правдоподобие монотонно возрастает с номером итерации. Данной свойство должно выполняется для всех EM-алгоритмов.

Список литературы

1. Dempster A. P., Laird N. M., Rubin D. B. Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 1977, Vol. 39, No. 1, pp. 1–38.

2. Meng X.-L., Rubin D. B. Maximum likelihood estimation via the ECM algorithm: a general framework. *Biometrika*, 1993, Vol. 80, No. 2, pp. 267–278.

3. Fessler J. A., Hero A. O. Space-alternating generalized expectation-maximization algorithm. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1994, Vol. 42, No. 10, pp. 2664–2677.

4. Miller M. I., Fuhrmann D. R. Maximum‐likelihood narrow‐band direction finding and the EM algorithm. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1990, Vol. 38, No. 9, pp. 1560–1577.

5. Feder M., Weinstein E. Parameter estimation of superimposed signals using the EM algorithm. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1988, Vol. 36, No. 4, pp. 477–489.

6. Gong M.-Y., Lyu B. Alternating maximization and the EM algorithm in maximum‐likelihood direction finding. *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 2021, Vol. 70, No. 10, pp. 9634–9645.

7. Gong M.-Y., Lyu B. EM and SAGE Algorithms for DOA Estimation in the Presence of Unknown Uniform Noise. *Sensors*, 2023, Vol. 23, No. 10.

8. Gong, M.-Y.; Lyu, B. Stochastic Maximum Likelihood Direction Finding in the Presence of Nonuniform Noise Fields. *Electronics*, 2023, Vol. 12, No. 10.

9. Schwartz O., Dorfan Y., Taseska M., Habets E. A. P., Gannot S. DOA estimation in noisy environment with unknown noise power using the EM algorithm. *2017 Hands-free Speech Communications and Microphone Arrays (HSCMA)*, San Francisco, CA, USA, 2017, pp. 86–90.

10. Xunxue C., Kegen Y., Songsheng L. Direction Finding for Transient Acoustic Source Based on Biased TDOA Measurement. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2016, Vol. 65, No. 11, pp.2442–2453.

11. Wen F., Liu W., Lu X. Distributed Expectation-Maximization Algorithm for DOA Estimation in Wireless Sensor Networks. *2015 IEEE International Conference on Digital Signal Processing (DSP)*, Singapore, 2015, pp. 944–947.

УДК: 534.6 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39540

Акустическая диагностика состояния конструкций при воздействии гидростатического давления

И.А. Усачева[1,a], А.С. Горшонков[1,b], К.А. Костылев[1,c], М.Б. Салин[1,d]

[1]*«Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова - Грехова Российской академии наук (ИПФ РАН)». г. Нижний Новгород, 603950, Россия.*

E-mail: [a]usacheva@ipfran.ru, [b]gorshonkov@ipfran.ru, [c]kostylev@ipfran.ru, [d]mikesalin@ipfran.ru

Аннотация: Предложен метод диагностики потери устойчивости упругих конструкций под статическим давлением, основанный на контроле спектра собственных частот и корректировке модели в напряженно-деформированном состоянии. Он обеспечивает текущий контроль нагрузки, выявление дефектов и прогноз опасных ситуаций. Подход проверен на образцах герметичных контейнеров для глубоководной гидроакустики, испытанных в камере высокого давления до разрушения. Результаты демонстрируют достаточную точность и перспективы для неразрушающего контроля.

Ключевые слова: диагностика, потеря устойчивости, напряженно-деформированное состояние, упругие конструкции, неразрушающий контроль

Acoustic diagnostics of the state of structures under the influence of hydrostatic pressure

I.A. Usacheva[1,a], A.S. Gorshonkov[1,b], K.A. Kostylev[1,c], M.B. Salin[1,d]

[1]*«Federal Research Center Institute of Applied Physics named after A.V. Gaponova-Grekhova of the Russian Academy of Sciences (IAP RAS)». Nizhny Novgorod, 603950, Russia.*

E-mail: [a]usacheva@ipfran.ru, [b]gorshonkov@ipfran.ru, [c]kostylev@ipfran.ru, [d]mikesalin@ipfran.ru

Abstract: A method for diagnosing the loss of stability of elastic structures under static pressure is proposed, based on monitoring the spectrum of natural frequencies and adjusting the model in the stress-strain state. This method provides ongoing load control, defect detection, and prediction of hazardous situations. The approach has been tested on samples of airtight containers for deep-sea hydroacoustics, which were tested in high pressure chamber until they failed. The results demonstrate sufficient accuracy and potential for non-destructive testing.

Keywords: diagnostics, loss of stability, stress-strain state, elastic structures, non-destructive testing

PACS: 04.30.Nk

Введение

Контроль состояния нагруженных технических объектов, особенно глубоководных сооружений, является важным аспектом обеспечения их надежности. В условиях ограниченного доступа и воздействия сжимающих нагрузок такие конструкции испытывают сложное напряженно-деформированное состояние (НДС), обусловленное статическими и циклическими нагрузками, температурой и другими факторами. Недостаточная точность существующих методов контроля, обусловленная прочностной неоднородностью материалов и упрощениями в испытаниях, требует их усовершенствования [1]. Перспективным методом диагностики является акустическая эмиссия (АЭ), позволяющая выявлять процессы накопления усталостных повреждений, предвещающих потерю прочности конструкции. Однако сложности выделения сигналов АЭ, а также риск необратимых изменений конструкции при их генерации, ставят под вопрос эффективность существующих стандартов и требуют разработки новых технологий АЭ контроля [1].

Авторы полагают, что эффективным методом диагностики нагружения подводных аппаратов гидростатическим давлением является постоянный мониторинг собственных частот корпуса и их изменений под воздействием НДС. Подход включает два этапа: сначала численное моделирование для предварительной оценки собственных частот и их изменений - получения начальной информации; затем - автоматический спектральный анализ акустического излучения или отклика на внешние воздействия для выявления нештатных нагрузок и нарушений целостности. Метод предполагает также доводку численной модели по результатам измерений, что позволяет повысить точность диагностики, обеспечивая эффективное неразрушающее выявление дефектов. Поскольку эффект НДС не имеет порогового характера, данный подход превосходит традиционные АЭ-технологии по эффективности ранней диагностики. В статье представлена верификация предложенной методики на примере упрощенной модели герметичной цилиндрической оболочки (см. рис. 1, *а*), подвергающейся критическим нагрузкам при имитации глубоководного погружения с помощью камеры высокого давления (КВД).

1 Методы и модели исследования

Герметичные конструкции, при превышении критического уровня внешнего давления разрушаются из-за потери механической устойчивости. Этот процесс связан с переходом системы в неустойчивое состояние, при котором упругая возвращающая сила перестает компенсировать нагрузки, что проявляется в обращении в ноль одной из собственных частот оболочки. Методы определения критической нагрузки включают как компьютерное моделирование, так и натурные испытания на разрушение. Натурные испытания более точны,

но требуют значительных затрат времени и ресурсов. В то же время, компьютерное моделирование - более экономичный и быстрый способ получения оценок, однако его точность зависит от качества моделей и исходных данных, и результаты являются ориентировочными.

В коммерческих программных пакетах для линейного анализа устойчивости решается задача на собственные значения, определяющая собственные λ параметры матрицы добавочной жесткости $[K_\sigma]$, при которых суммарная матрица жесткости системы в терминах одного из собственных векторов стремится к нулевой:

$$([K_0] + \lambda[K_\sigma])\{u\} = 0. \quad (1)$$

где $[K_0]$ — матрица жесткости, $[K_\sigma]$ — матрица геометрической жесткости, $\{u\}$ — собственный вектор. Вывод матрицы геометрической жесткости опущен из-за объема, однако подробно изложен в работе [2]. После поиска вектора собственных значений λ_n, величину критической нагрузки можно оценить так:

$$\{F_n\} = \lambda_n \cdot \{F_0\},$$

где $\{F_0\}$ – распределение сил по внешним узлам модели, полученное умножением пробного внешнего давления P_0 на площади элементарных площадок, n – номер формы колебаний. Номер n варьируется от 1 до числа степеней свободы модели, однако наиболее интересным является минимальное значение λ_n и соответствующее ему n, поскольку потеря устойчивости произойдет в первую очередь по форме колебаний с данным номером, описываемой собственным вектором $\{u\}$.

В настоящем исследовании применялось отечественное программное обеспечение «CATEC» [3], реализующее конечно-элементный подход, в котором влияние начальной нагрузки учитывается в гармоническом анализе при оценке виброакустического отклика. Этот метод подробно описан в работе [2]. Модель задается уравнением вида:

$$\left([K_0] + \frac{P}{P_0}[K_\sigma]\right)\{u\} + \omega^2[M]\{u\} = \{F\}, \quad (2)$$

где ω −циклическая частота, P −действующее избыточное внешнее давление (при сжимающей нагрузке $P < 0$, при растягивающей $P > 0$), $[M]$ − матрица масс, $\{F\}$ − внешняя гармоническая сила.

Данный подход исключает необходимость вычисления собственных значений λ по (1), что позволяет осуществлять контроль состояния конструкции по экспериментально измеряемым собственным частотам и определять внешнюю статическую нагрузку P, при которой достигается потеря устойчивости ($\omega = 0$). Отличительной особенностью программного обеспечения «CATEC» по сравнению с другими коммерческими пакетами является возможность дополнительной корректировки конечно-элементной модели (КЭМ) на

основе экспериментальных данных. Процесс корректировки [4] сводится к подбору модуля Юнга конструкции таким образом, чтобы рассчитанные по КЭМ собственные частоты соответствовали измеренным значениям. Это обеспечивает локализацию дефектов и выявление различий между идеализированной КЭМ и реальной конструкцией. Кроме того, процедура корректировки неявно учитывает нелинейные особенности поведения конструкции при нагружении, компенсируя сложности их явного моделирования в рамках линейной модели (2).

2 Верификация модели

Для верификации предложенной модели (2) в «CATEC» была выполнена серия экспериментов в КВД с водной средой для исследования динамических и акустических характеристик герметичного контейнера (диаметром 71 мм, толщиной 1.5 мм - см. рис. 1, *а*) под воздействием внешнего гидростатического давления. Целью было определить критическую нагрузку — давление, при котором происходит резкое изменение виброакустических параметров, указывающее на потерю устойчивости. В ходе испытаний внутри КВД (диаметром 0.75 м, глубиной 3 м, диапазон давления до 10 МПа) на специальной штанге подвешивался герметичный контейнер с закрепленным внутри динамиком (27 мм, 4 Ом), возбуждающим сигналы с линейной частотной модуляцией в диапазоне 1–3 кГц. Внутри камеры регистрировалась реакция системы с помощью гидрофона, фиксирующего давление. Постепенное увеличение давления моделировало нагрузку при погружении конструкции. Акустические данные собирались до 6 МПа, они использовались для корректировки КЭМ. По техническим причинам далее давление повышалось без регистрации для выявления момента потери устойчивости. В результате зафиксировано «схлопывание» контейнера при давлении около 10 МПа (см. рис. 1, *б*).

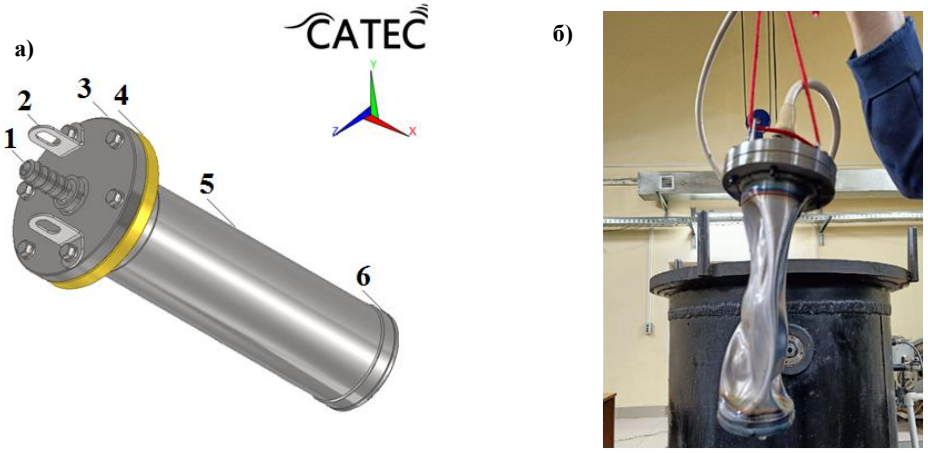


Рис. 1 – Конструктивный облик герметичного контейнера:
(а) – сборка: 1 - герметичный выход кабеля динамика, 2 - крепление, 3 - водонепроницаемая крышка, 4 - фланец, 5 - труба, 6 - заглушка; и его состояние (б) на момент его «схлопывания»

3 Результаты и их обсуждение

В рамках оценки изменений виброакустических характеристик при НДС в программном обеспечении «CATEC» проведено сопоставление результатов гармонического отклика герметичного контейнера при переменном внешнем давлении в соответствии с моделью (2). В качестве источника возбуждения колебаний рассматривалась единичная гармоническая нагрузка, приложенная в том же месте, что и динамик в эксперименте. Предполагалось, что цилиндрическая часть корпуса модели подвергается равномерной сжимающей гидростатической нагрузке. На всем диапазоне сжимающих нагрузок, в пределах которого проводились акустические измерения, доводка КЭМ осуществлялась по двум состояниям: при давлениях 0 МПа и 3 МПа. Первая доводка предназначена для отражения реального распределения жесткостей, характерного для натурного объекта; вторая — для учета эффектов, возникающих в конструкции при росте внешнего давления, которых не учитывает исходная модель.

Результаты моделирования с учетом доводки КЭМ в сравнении с экспериментальными данными, представлены на рис. 2, *а* в виде частотно-нагрузочной диаграммы, где по оси абсцисс - частота, по ординате - гидростатическое давление, а уровень амплитуды акустического давления отображен цветом. Анализ амплитудно-частотных характеристик выявляет локальные максимумы, соответствующие собственным частотам конструкции. Резкие цветовые изменения указывают на возбуждение резонансных режимов, а нумерованные линии демонстрируют их эволюцию с увеличением нагрузки, что позволяет оценить влияние напряженного состояния на динамические свойства. На рис. 2, *в* представлены визуализации характерных форм колебаний, а на рис. 2, *б* -распределение жесткостей после доводки при 3 МПа, показывающее выраженную асимметрию, свидетельствующую о неоднородностях реальной конструкции и ее отклонениях от исходной модели. С увеличением внешнего давления некоторые резонансные частоты снижаются. Особенно подвержены воздействию НДС окружные моды колебаний (линии (2) и (4) на рис. 2, *а*), при которых распределение перемещений повторяет форму потери устойчивости — "схлопывание" в области цилиндрической части (по аналогии с формой (4)). Совпадение расчетных и экспериментальных данных подтверждает влияние начальной нагрузки на виброакустические параметры и показывает возможность использования метода для оценки допустимых эксплуатационных нагрузок.

Следует отметить, что по сравнению с результатами предыдущего исследования [5], в котором численная оценка критической нагрузки осуществлялась без учета корректировки КЭМ, прогноз составлял 13.6 МПа. Введение дополнительного этапа доводки модели позволило значительно снизить расхождение и получить новые численные оценки критической

нагрузки (потеря устойчивости контейнера происходит при 11 МПа, о чем свидетельствует пересечение линии (4) с осью ординат при этой нагрузке - см. рис. 2, *а*), что приближает их к экспериментальным данным (10 МПа). При этом погрешность снизилась с 30% до 10%. Повышение точности свидетельствует о том, что локальные неоднородности и дефекты реальной конструкции существенно влияют на фактическую критическую нагрузку. Оставшееся расхождение в пределах 10% можно объяснить возникновением нелинейных эффектов, таких как развитая пластичность, которые не были явно учтены в модели. Решением данной проблемы может стать проведение дополнительной доводки модели в диапазоне нагрузок, превышающем 8 МПа.

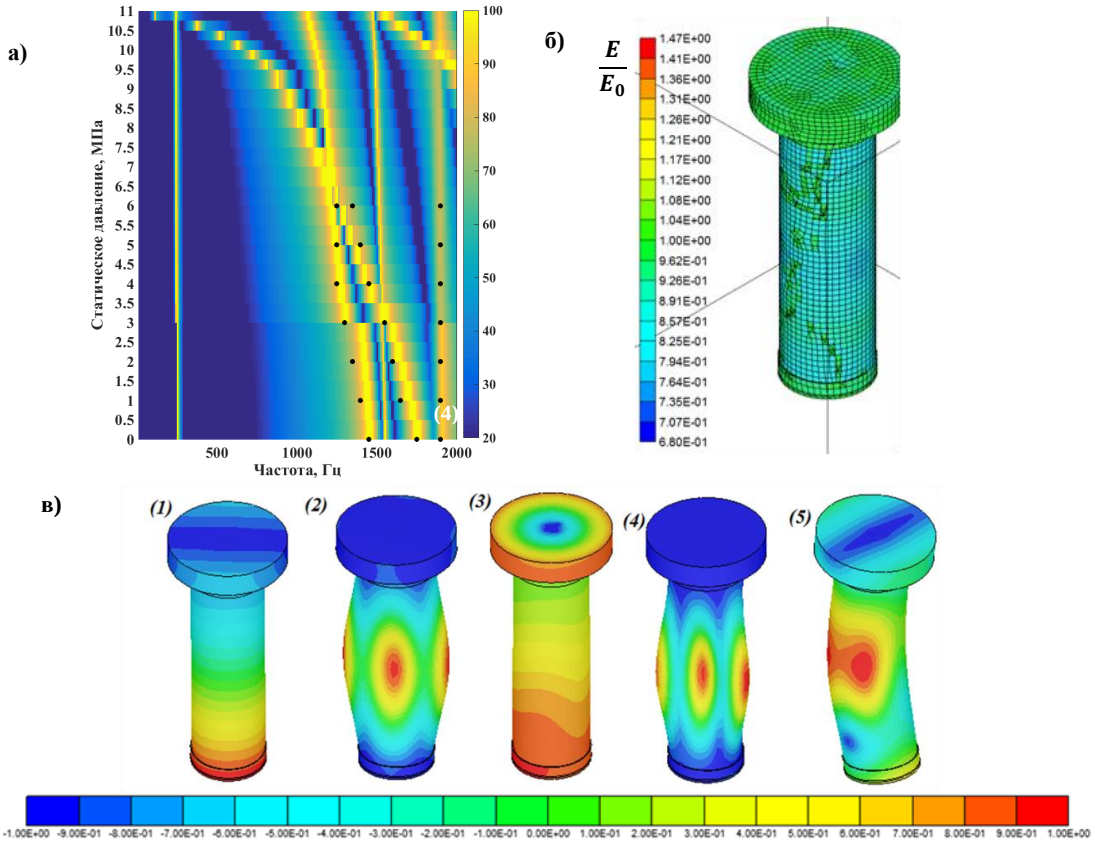


Рис. 2 – Результаты оценки изменений виброакустических характеристик при НДС в программном обеспечении «CATEC»: а – зависимость модуля акустического давления (дБ отн. 20 мкПа) от частоты и величины внешнего давления, б - распределение жесткости КЭМ после доводки по экспериментальным данным при 3 МПа, в - формы колебания контейнера - реальная часть перемещений

Заключение

В работе представлен метод конечно-элементного моделирования виброакустических характеристик глубоководных сооружений под гидростатическим давлением как теоретическое обоснование способа диагностики. Метод продемонстрирован на модели герметичной цилиндрической оболочки и подтвержден расчетами и экспериментами, показывающими снижение резонансных частот, особенно у окружных мод колебаний, приближающихся к потере устойчивости. Этот подход перспективен для диагностики элементов и систем, повышая надежность и безопасность подводных сооружений.

Авторы выражают благодарность Павлу Ивановичу Коротину за ценные дискуссии. Работа выполнена при поддержке госзадания ИПФ РАН, проект № FUFF-2024-0040.

Список литературы

1. *Носов В.В., Номинас С.В., Зеленский Н.А.*, Оценка прочности сосудов давления на основе использования явления акустической эмиссии// Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2015. 2(**219**), С. 182-190.

2. *Салин М.Б., Усачева И.А.*, Возможность учета напряженно-деформированного состояния конструкций в акустических задачах при суперкомпьютерном моделировании // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2025. **24**, № 3. С. 113-122.

3. *Suvorov, A.S., Sevriukov, O.F., Sokov, E.M., Salin, M.B., Zaitseva, S.G. and Sharagina, V.A.*, Software for Acoustic Design // Journal of Applied Mathematics and Physics. 2023. **11**, 2515-2522

4. *Суворов А.С., Соков Е.М., Вьюшкина И.А.*, Регулярный алгоритм автоматической корректировки спектральных характеристик акустических конечно-элементных моделей // Акустический журнал. 2016. **62**, № 2, С.592-599

5. *Горшонков А.С., Костылев К.А., Салин М.Б., Усачева И.А*., Акустическая диагностика состояния конструкции при воздействии гидростатического давления // Подводные исследования и робототехника. 2025. **54**, № 4, С.51-62

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39541

О повышении эффективности акустического метода диагностики сплошных сред бесконтактным методом

П.В Накоряков[1], Г.И. Павлов[2], М.Д. Тимофеев[3a], А.В. Поляев[4]

[1,2,3,4]Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ

email: [a]misha_timofeev@internet.ru

Аннотация. Акустический метод неразрушающего контроля (акустическая дефектоскопия) основан на применении упругих колебаний (волн), возбуждаемых или возникающих в контролируемом объекте. Метод позволяет обнаруживать поверхностные и внутренние дефекты (нарушения сплошности, неоднородность структуры, межкристаллитную коррозию, дефекты склейки, пайки, сварки и т. д.) в заготовках и изделиях из различных материалов. Наибольшее применение в дефектоскопии получили ультразвуковые методы, однако они требуют подготовки поверхностей и использования контактной жидкости или геля, что в большинстве случаев недопустимо. Поэтому в настоящее время развитие получают акустические методы, использующие бесконтактные способы возбуждения колебаний и съема диагностической информации. Предлагаемый метод диагностики состоит в бесконтактном возбуждении упругих свободных колебаний с помощью ударной волны высоковольтного разряда в воздухе вблизи поверхности объекта контроля, а также бесконтактным способом съема диагностической информации конденсаторным микрофоном по одному каналу и лазерным виброметром по второму каналу. Использование двух каналов регистрации диагностической информации позволяет повысить достоверность диагностирования дефектов в исследуемом объекте.

Ключевые слова: диагностика сплошных сред, бесконтактный метод, акустический метод.

On improving the efficiency of the acoustic method of continuous media diagnostics by the contactless method

P.V. Nakoryakov[1], G.I. Pavlov[2], M.D. Timofeev[3], A.V. Polyaev [4]

[1,2,3,4]Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI

E-mail: [3]misha_timofeev@internet.ru

Abstract. The acoustic method of non-destructive testing (acoustic flaw detection) is based on the application of elastic vibrations (waves) excited or occurring in a controlled object. The method

makes it possible to detect surface and internal defects (irregularities in continuity, heterogeneity of structure, intercrystalline corrosion, defects in gluing, soldering, welding, etc.) in blanks and products made of various materials. Ultrasonic methods are most widely used in flaw detection, but they require surface preparation and the use of a contact liquid or gel, which in most cases is unacceptable. Therefore, acoustic methods using non-contact methods of excitation of vibrations and removal of diagnostic information are currently being developed. The proposed diagnostic method consists in non-contact excitation of elastic free vibrations by means of a high-voltage discharge shock wave in the air near the surface of the control object, as well as a non-contact method for removing diagnostic information with a condenser microphone on one channel and a laser vibrometer on the second channel. The use of two channels for registering diagnostic information makes it possible to increase the reliability of diagnosing defects in the object under study.

Keywords: continuous media diagnostics, contactless method, acoustic method.

С помощью акустических методов в заготовках и изделиях, изготовленных практически из любых материалов, можно обнаруживать поверхностные и внутренние дефекты, представляющие собой нарушение сплошности, неоднородность структуры, зоны поражения межкристаллитной коррозией, дефекты склейки, пайки, сварки и т.п. К основным преимуществам контроля акустическими методами относятся: высокая чувствительность, позволяющая выявлять мелкие дефекты; большая проникающая способность, позволяющая обнаруживать внутренние дефекты в крупногабаритных изделиях; возможность определения места и размеров дефекта; практически мгновенная индикация дефектов, позволяющая автоматизировать контроль; простота и высокая производительность контроля; полная безопасность работы оператора и окружающего персонала. Имеется множество акустических методов контроля изделий: ультразвуковой, метод акустической эмиссии, велосиметрический метод, импедансный метод, локальный метод свободных колебаний, акустико-топографический метод. Несмотря на вышеуказанные преимущества, имеется ряд факторов, затрудняющие применение акустических методов. К ним следует отнести шероховатость поверхности контроля, кривизну поверхности, малые габариты и масса контролируемых изделий, неконтролируемые зоны. Наименее подвержен этим недостаткам локальный метод свободных колебаний.

Метод свободных колебаний (МСК) основан на возбуждении свободно затухающих упругих колебаний в контролируемом объекте и анализе параметров этих колебаний. Если используются колебания контролируемого объекта как единого целого, то это интегральный вариант МСК, если колеблется только часть контролируемого объекта - то это локальный

вариант МСК. Локальный метод требует сканирования всей поверхности контролируемого изделия.

Метод основан на возбуждении ряда частот при коротком ударе контролируемого объекта, причем, чем короче импульс удара, тем шире полоса возбужденных частот.

Для приема колебаний используется микрофон или пьезоприемник. Микрофон имеет гладкую амплитудно-частотную характеристику, но более чувствителен к внешним акустическим помехам. Пьезоприемник подвержен фрикционным шумам. Информативным параметром в МСК служит спектр сигнала.

С помощью МСК выявляются дефекты в многослойных конструкциях и изделиях из пластика. МСК позволяет контролировать изделия из материалов с малыми модулями Юнга, высоким коэффициентом затухания упругих колебаний (резина, пенопласт и т. п.) и обнаруживать дефекты на большой глубине залегания (до 300 мм в пластике). Основной способ возбуждения - электромеханический, хотя известны и некоторые другие, например: пьезоэлектрический, электромагнитно-акустический, газодинамический, оптический. Электромеханический способ возбуждения колебаний, несмотря на простоту реализации, имеет существенные недостатки:

- большой уровень механических помех при ударе;

- нестабильность силы удара из-за трения и износа якоря электромагнита;

-«зашумленность» акустического сигнала из-за звуков при возврате электромагнита в исходное положение.

В связи с этим, как уже отмечалось выше, исследуются более эффективные, так называемые безконтактные методы воздействия импульса силы на диагностируемый объект. Из литературных данных известно [1-4], что перспективен способ возбуждении колебаний с помощью импульса инфракрасного лазера. Однако применение этого метода требует использование дорогостоящего оборудования, соблюдения повышенных мер безопасности по защите зрения и использование специального помещения в производственном цехе.

Авторами статьи предложено новое устройство для возбуждения колебаний – электроразрядный генератор ударных волн, который имеет более стабильные характеристики возбуждения, чем электромеханический. Это доказано экспериментальными исследованиями.

Исследования проводились на двух разных устройствах. Первое устройство работало по принципу электромеханического ударника, второе создавало ударную волну электразрядным генератором.

В качестве объекта исследования использовалась плоская панель из трехслойного углепластика размерами 120х250 мм, зажатая одной стороной через резиновые прокладки. Запись акустических сигналов осуществлялась с помощью конденсаторного микрофона и

измерительного комплекса «Экофизика-110А». Обработка сигналов проводилась с помощью программы «Сигнал+».

На рис. 1 показана осциллограмма записи при возбуждении колебаний механическим электроударником.

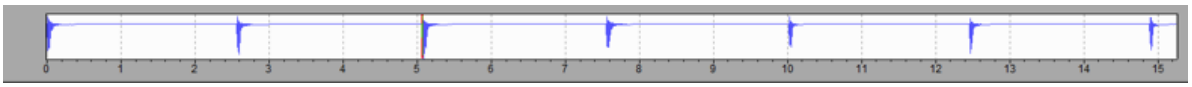


Рис. 1. Осциллограмма сигнала при механическом возбуждении колебаний

Из осциллограммы видно, что импульсы сильно отличаются по амплитуде друг от друга: первый и третий удары возбудили более сильный сигнал, чем второй, четвертый и пятый. Неравномерность усилия удара очевидна. Нестабильность амплитуды колебаний сигнала непосредственно влияет на доверительный интервал акустического портрета изделия и точность определения дефектов. Другая картина наблюдается на рис. 2, на котором приведена аналогичная осциллограмма, записанная при возбуждении колебаний высоковольтным разрядом.



Рис. 4. Осциллограмма сигнала при возбуждении колебаний ударной волной электроразрядника

Из осциллограммы можно заметить, что разброс в амплитудах сигналов практически отсутствует. Это способствует получению более качественного «акустического портрета изделия» с минимальными отклонениями от среднего, следовательно, получению достоверной информации об объекте исследования.

Для получения количественных параметров амплитуд записанные акустические сигналы обрабатывались в программе «Сигнал+». Для примера, на рис. 3 приведены амплитудные спектры этих сигналов.

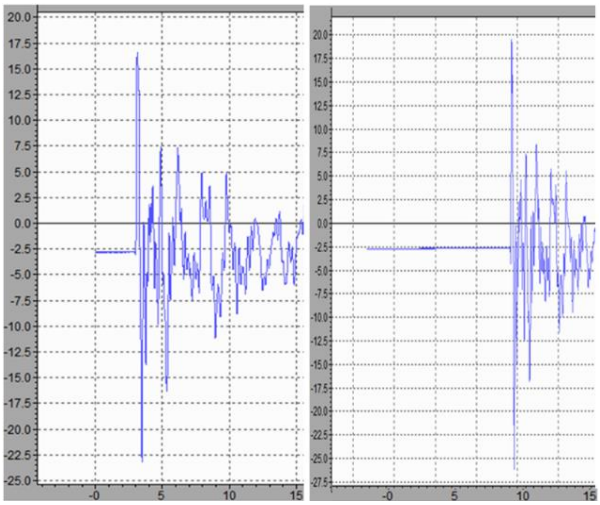


Рис. 3. Амплитудные спектры двух акустических сигналов, записанных при работе электроразрядного генератора ударных волн

Из рисунка видно, что спектры сигналов отличаются не только амплитуде, но и по продолжительности. В нижеприведенных таблицах приведены количес твенные значения отклонений амплитуд, полученных в зависимости от номера удара.

Таблица 1. К оценке амплитуд сигналов при механическом возбуждении колебаний

Номер удара	Верхний отсчет, мВ	Нижний отсчет, мВ	Двойная амплитуда, мВ	Средняя амплитуда, мВ	Отклонение, мВ	Отклонение,%
1	18	-23	41	42,3	-1,3	-3,1
2	20	-26	46	42,3	3,7	8,7
3	22,5	-30	52,5	42,3	10,2	24,1
4	20,5	-26	46,5	42,3	4,2	10
5	18	-22	40	42,3	-2,3	-5,4
6	13	-15	28	42,3	-14,3	-33,8
7	21	-21	42	42,3	-0,3	-0,7

Анализ табличных данных свидетельствует о том, что отклонения амплитуд в зависимости от номера удара могут отличаться от +24 до -34%. Для снижения погрешности требуется проведение многократных измерений, что увеличивает продолжительность и трудоемкость испытаний.

Таблица 2 К оценке амплитуд сигналов при возбуждении колебаний электроразрядным генератором

Верхний отсчет, мВ	Нижний отсчет, мВ	Двойная амплитуда, мВ	Средняя амплитуда, мВ	Отклонение, мВ	Отклонение,%
-2,22	-3,38	1,16	1,18	-0,02	-0,4
-2,08	-3,3	1,22	1,18	0,04	0,9
-2,14	-3,3	1,16	1,18	-0,02	-0,4
-2,18	-3,42	1,24	1,18	0,06	1,4
-2,24	-3,5	1,26	1,18	0,08	1,8
-2,14	-3,3	1,16	1,18	-0,02	-0,4
-2,08	-3,18	1,1	1,18	-0,08	-1,8

Из табличных данных видно, что отклонение амплитуды колебаний не превышает 2%, что должно существенно повысить достоверность информации, получаемой при диагностике структуры изделий методом свободных колебаний.

Список литературы

1. *Мурашов В. В.* Исследование характеристик акустического метода свободных колебаний / В. В. Мурашов // Контроль. Диагностика. — 2017. — № 3. — С. 4–10.

2. *Шубин А. Ю.* Проведение неразрушающего контроля методом локальных свободных колебаний (локального метода свободных колебаний) с применением лазерного комплекса ПСК-1 / А. Ю. Шубин, Н. А. Степанов, В. В. Мурашов // Труды ВИАМ. — 2010. — № 4 (86). — С. 86–94.

3. Damage detection of truss bridge elements using an enhanced pseudo-local flexibility method / [author(s)] // ResearchGate. — 2024. — URL: https://www.researchgate.net/publication/376268179_Damage_detection_of_truss_bridge_elements_using_an_enhanced_pseudo-local_flexibility_method (дата обращения: 25.03.2026).

4. *Hsu T. Y.* An experimental study of the pseudo-local flexibility method for damage detection of hyper-static beams / T. Y. Hsu, S. Y. Shiao, W. I. Liao, C. H. Loh // 7th European Workshop on Structural Health Monitoring. — 2014. — URL: https://www.researchgate.net/publication/281076611_An_Experimental_Study_of_the_Pseudo-Local_Flexibility_Method_for_Damage_Detection_of_Hyper-Static_Beams (дата обращения: 25.03.2026).

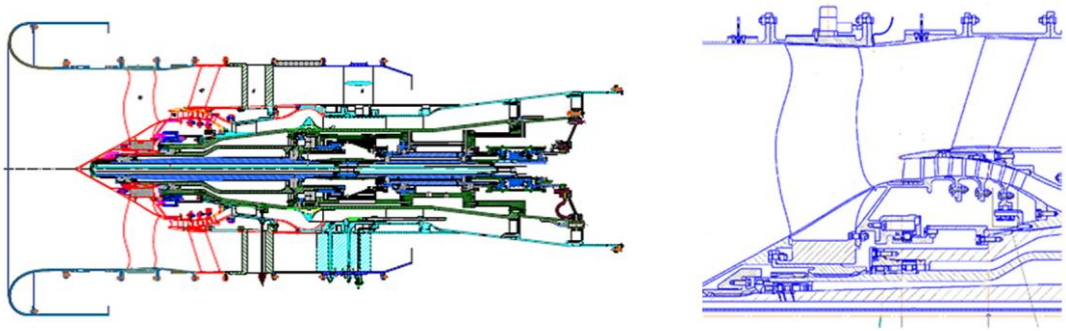
5. *Загретдинов, А. Р.* Аппаратно-программное обеспечение ударно-акустического контроля композиционных конструкций / А. Р. Загретдинов, А. Е. Кондратьев, Ш. Г. Зиганшин // Инженерный вестник Дона. – 2025. – № 1. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/apparatno-programmnoe-obespechenie-udarno-akusticheskogo-kontrolya-kompozitsionnyh-konstruktsiy (дата обращения: 25.03.2026). – Текст : электронный.

6. *Sugimoto, T*. Non-Contact Acoustic Inspection Method using Air-borne sound for Concrete Structures / T. Sugimoto, R. Akamatsu, N. Utagawa, K. Katakura // 11th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2014) : proceedings, October 6-10, 2014, Prague, Czech Republic. – Prague, 2014. – URL: https://www.ndt.net/article/ecndt2014/papers/560_Sugimoto.pdf (дата обращения: 25.03.2026). – Текст : электронный.

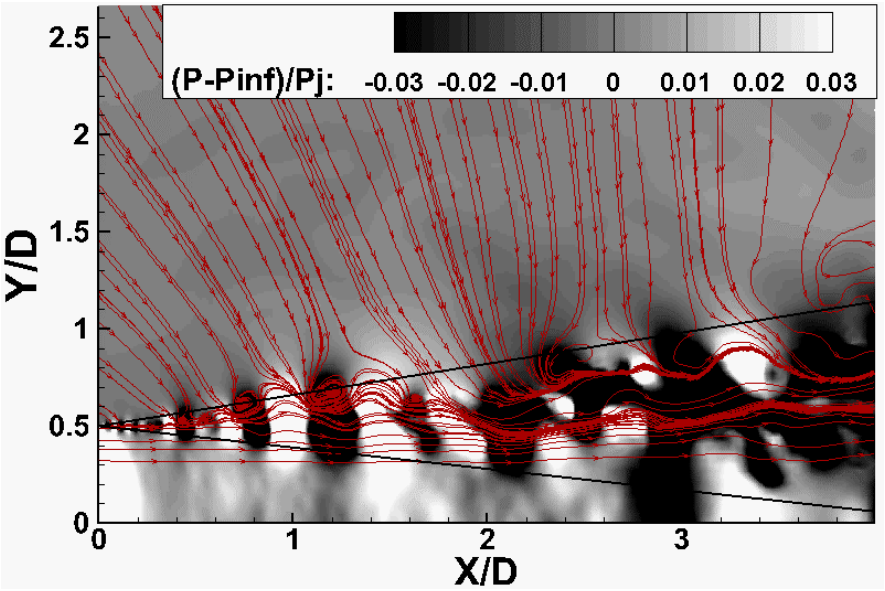
7. *Sugimoto, T.* Study on the Long Distance Non-Contact Acoustic Inspection Method using a Strong Ultrasonic Sound Source / T. Sugimoto, K. Sugimoto, N. Utagawa, K. Katakura // 19th World Conference on Non-Destructive Testing (WCNDT 2016). – 2016. – URL: https://www.ndt.net/article/wcndt2016/papers/we4a3.pdf (дата обращения: 25.03.2026). – Текст : электронный.

Назад к содержанию секции

СЕКЦИЯ АЭРОАКУСТИКА



(а) (б)



назад к Содержанию

СОДЕРЖАНИЕ СЕКЦИИ АЭРОАКУСТИКА

1. ЗВУКОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ГОРЯЧИХ ЛОКАЛИЗОВАННЫХ ВИХРЕЙ
Копьев В.Ф., Чернышев С.А. 574

2. РОЛЬ ВЯЗКОСТИ В ИЗЛУЧЕНИЯ ШУМА ТУРБУЛЕНТНЫМ ПОГРАНИЧНЫМ СЛОЕМ
Миронов М.А., Копьев В.Ф., Беляев И.В., Панкратов И.В. 576

3. О РАСПОЛОЖЕНИИ ИСТОЧНИКОВ ШУМА ТУРБУЛЕНТНОЙ СТРУИ
Крашенинников С.Ю., Бендерский Л.А. 578

4. КИНЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОПИСАНИЮ ИСТОЧНИКОВ АКУСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛОСКИХ ВИХРЕВЫХ СИСТЕМ
Чернышев С.А., Демьянов М.А., Копьев В.Ф. 585

5. ОБ ИЗЛУЧЕНИИ ШИРОКОПОЛОСНОГО ШУМА СОТОВЫМИ ЗПК ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ
Остриков Н.Н., Ипатов М.С. 587

6. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФИЛЬТРА ТИПА КАЛМАНА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ИМПЕДАНСА ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ НАЛИЧИИ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА
Денисов С.Л., Ипатов М.С. 589

7. О РЕЗУЛЬТАТАХ РАСЧЕТА ЭВОЛЮЦИИ СИСТЕМЫ УДАРНЫХ ВОЛН И ИХ МОДАЛЬНОГО СОСТАВА В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КАНАЛЕ С ПОТОКОМ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗПК ВО ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТИ
Макаров В.Е., Шорстов В.А. 591

8. МОДЕЛИРОВАНИЕ ШУМА ПЕРЕПУСКНОГО КЛАПАНА ПРОТИВОПОМПАЖНОЙ СИСТЕМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ LES И МЕТОДОВ ПОНИЖЕННОГО ПОРЯДКА НА ОСНОВЕ АКУСТИЧЕСКОЙ АНАЛОГИИ
Карабасов С.А., Солнцев И.А. 597

9.ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОАКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК САМОЛЕТНЫХ ВИНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОБСТВЕННОГО РАСЧЕТНОГО КОДА АКУСТИЧЕСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ ЦАГИ
Титарев В.А., Фараносов Г.А., Акиньшин Р.В. 599

10. АЭРОАКУСТИКА ЛЕГКИХ ВИНТОВЫХ САМОЛЕТОВ
Мошков П.А. 601

11. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ОТРАЖЕНИЯ ЛЧМ-ПОСЫЛКИ ВРАЩАЮЩИМСЯ ВИНТОМ
Князева К.С., Шуруп А.С. 607

12. ВЛИЯНИЕ ВЫСТУПАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ НА ПОЛЕ ПРИСТЕНОЧНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ
Кузнецов С.В., Голубев А.Ю. 609

13. РАСЧЕТ АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИНТА В ПК FLOWVISION
Аксенов А.А., Радостин А.В., Февральских А.В. 611

14. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ УПРОЩЕННОГО ОДНОЛОПАСТНОГО ПОДХОДА И РАСЧЕТА ПОЛНОЙ КОНФИГУРАЦИИ В ЗАДАЧЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТОНАЛЬНОГО ШУМА НЕСУЩЕГО ВИНТА С РАЗЛИЧНЫМ ЧИСЛОМ ЛОПАСТЕЙ
Воронцов В.И., Зайцев М.Ю., Фараносов Г.А. 615

15. РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КЛОКИНГА НА ТОНАЛЬНЫЙ ШУМ ПЕРВЫХ ДВУХ ПОДПОРНЫХ СТУПЕНЕЙ КНД ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ
Россихин А.А., Милешин В.И. 617

16. АНАЛИЗ ГЕНЕРАЦИИ ЗВУКА В ВОЗДУХОВОДЕ ОСЕВЫМ ВЕНТИЛЯТОРОМ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ КРОУ-АРТАМОНОВА И РИБНЕРА
Аксенов А.А., Тимушев С.Ф., Мошков П.А.., Клименко Д.В., ...623

17. КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ АКУСТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЙ ОБРАЗЦОВ В ИМПЕДАНСНОЙ ТРУБЕ
Остроумов М.Н., Мошков П.А. 629

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39542

Звуковое излучение горячих локализованных вихрей

Копьев В.Ф., Чернышев С.А.
ФАУ «ЦАГИ» НИЦ аэроакустики, ул. Радио 17, Москва, 105005 Россия
E-mail: vkopiev@mktsagi.ru

Акустическое излучение горячих потоков обладает особенностями, связанными с появлением дипольной составляющей, которая доминирует при малых числах Маха. В рамках этой проблемы рассматривается задача о собственных колебаниях и излучении шума двумерными (вихрь Ранкина) и трехмерными (цилиндрический вихрь и вихревое кольцо) горячими вихрями. Проведен анализ собственных колебаний цилиндрического горячего вихря и получен полный спектр длинноволновых колебаний. Показано, что горячий цилиндрический вихрь имеет дополнительную степень свободы, которая реализуется в энтропийной моде. Кроме того, различие плотности газа внутри и вне вихря сдвигает частоту кельвиновской моды так, что вырождение частот, характерное для холодного вихря, исчезает. Это обстоятельство позволяет перенести результаты анализа колебаний горячего цилиндрического вихря на тонкое горячее вихревое кольцо и получить для этого вихря спектр и форму колебаний в первом порядке, в отличие от случая холодного вихревого кольца, для которого вырождение частот снимается только в следующих порядках по параметру тонкости. Проведенный анализ показывает, что наличие дополнительной степени свободы у течений с переменной плотностью качественно меняет характеристики вихря, как колебательной системы и как источника звука. В частности, показано, что у горячего вихревого кольца появляется продольное и поперечное дипольное звуковое излучение. Получены собственные колебания кольца, ответственные за эти формы звукового излучения.

Ключевые слова: колебания горячего цилиндрического вихря, колебания горячего вихревого кольца, энтропийная мода, дипольное излучение

Noise radiation by hot localized vortices

Kopiev V.F., Chernyshev S.A.
FAU TsAGI Research Center for Aeroacoustics, Radio Street 17, Moscow, 105005 Russia

The acoustic radiation of hot flows has features related to the appearance of a dipole component, which dominates at low Mach numbers. Within this problem, the problem of eigen-oscillations and noise radiation of two-dimensional (Rankine vortex) and three-dimensional (cylindrical vortex and vortex ring) hot vortices is considered. The analysis of eigen-oscillations of a cylindrical hot vortex is carried out and the full spectrum of long-wave oscillations is obtained. It is shown that a hot

cylindrical vortex has an additional degree of freedom, which is realized in the entropy mode. In addition, the difference in gas density inside and outside the vortex shifts the frequency of the Kelvin mode, causing the frequency degeneracy characteristic of a cold vortex to disappear.

This circumstance allows us to transfer the results of the analysis of the oscillations of a hot cylindrical vortex to a thin hot vortex ring and obtain the spectrum and shape of the oscillations in the first order for this vortex, in contrast to the case of a cold vortex ring, for which the frequency degeneracy is removed only in the following orders of the thinness parameter. The analysis shows that the presence of an additional degree of freedom in flows with variable density qualitatively changes the characteristics of the vortex as an oscillatory system and as a source of sound. In particular, it is shown that a hot vortex ring exhibits axial and transverse dipole sound radiation. The ring's eigen-oscillations responsible for these forms of sound radiation have been obtained.

Keywords: oscillations of a hot cylindrical vortex, oscillations of a hot vortex ring, entropy mode, dipole radiation.

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39543

Роль вязкости в излучения шума турбулентным пограничным слоем

Миронов М.А.[1,2)], **Копьев В.Ф.**[2)], **Беляев И.В.**[2)], **Панкратов И.В.**[2)]

[1)]*АО «АКИН», Москва*

[2)]*Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского, Москва*

Проблема излучения шума турбулентностью пограничного слоя (ТПС) на жесткой плоскости впервые поставлена в работе Крейчнана (1956) и с тех пор продолжает привлекать внимание акустиков. Актуальными являются два вопроса: создает ли плоская граница излучение дипольного типа и, если создает, то какова спектральная мощность этого излучения. Имеется две противоположные точки зрения на дипольный механизм излучения шума ТПС. В работе Пауэлла (1960) и последующих работах ряда исследователей утверждается, что плоскость выступает лишь в роли зеркала, которое отражает звук, излучаемый объемной турбулентностью, что приводит к удвоению мощности квадрупольного излучения. При этом касательные, дипольно излучающие напряжения, в принципе, существующие, должны быть очень малы для течений с большими числами Рейнольдса. Другая точка зрения сформулирована в работе К.А. Наугольных и С.А. Рыбака (1980). Здесь приведен веский теоретический аргумент в пользу дипольного излучения для турбулентного течения над пластиной. Взаимодействие турбулентности с границей сведено к отражению сдвиговых (вязких, вихревых) волн от границы. При отражении возникает, помимо отраженной сдвиговой волны, продольная звуковая волна (обратный эффект Константинова). Настоящий доклад посвящен последовательному обобщению теории Лайтхилла, учитывающему генерацию лайтхилловскими квадруполями вязких волн. Проведенный анализ показал, в частности, что при увеличении числа Рейнольдса эффект вязкости в преобразование вязких волн в звуковые не уменьшается, а, наоборот, увеличивается. Также в докладе описана оригинальная методика и соответствующая экспериментальная установка для измерения акустического шума ТПС.

Ключевые слова: пурбулентный пограничный слой, вязкость, касательные диполи, шум

The meaning of viscosity in noise radiation by a turbulent boundary layer

Mironov M.A.[1,2], **Kopiev V.F.**[2], **Belyaev I.V.**[2], **Pankratov I.V.**[2]

[1]*JSC «AKIN», Moscow*

[2]*Central Aerohydrodynamic Institute (TsAGI) Research center of aeroacoustics, Moscow, Russia.*

The problem of noise radiation by turbulent boundary layer (TBL) on a rigid plane was first posed by Kraichnan (1956) and since has continued to attract the attention of acoustic scientists. There are two actual questions: does a flat boundary generate dipole-type radiation and, if so, what is the spectral power of this radiation. Two opposing points of view on the dipole mechanism of TBL noise radiation do exist. Powell (1960) and folowing studies by a number of researchers argue that the plane acts as a mirror reflecting the sound emitted by volume turbulence, which leads to a doubling of the quadrupole radiation power. At the same time, tangential, dipole-radiating stresses, which in principle exist, should be very small for flows with high Reynolds numbers. Another point of view was formulated in the work of K.A. Naugolnykh and S.A. Rybak (1980). A compelling theoretical argument is presented in favor of dipole radiation for turbulent flow over a plate. The interaction of turbulence with the boundary is reduced to the reflection of shear (viscous, vortex) waves from the boundary. This reflection generates, in addition to the reflected shear wave, a longitudinal sound wave (the inverse effect of Konstantinov). This paper is devoted to a consistent generalization of Lighthill's theory, taking into account the generation of viscous waves by Lighthill quadrupoles. The analysis showed, in particular, that with increasing Reynolds number, the effect of viscosity on the transformation of viscous waves into sound waves does not decrease, but rather increases. The paper also describes an original methodology and corresponding experimental setup for measuring the acoustic noise of a TBL.

Keywords: turbulent boundary layer, viscosity, tangential dipoles, noise

УДК: 532.522.2:532.527:532.525.2 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39544

О РАСПОЛОЖЕНИИ ИСТОЧНИКОВ ШУМА В ТУРБУЛЕНТНОЙ СТРУЕ

С.Ю. Крашенинников, Л. А Бендерский

ФАУ ЦИАМ им. П.И. Баранова, 111116, РФ, г.Москва, ул. Авиамоторная 2.

Тел.: +7(915)394-9060

E-mail: sykrasheninnikov@ciam.ru, labenderskiy@ciam.ru

Аннотация: При дозвуковом истечении струи из сопла возникает динамический процесс с интенсивным пульсационным движением. Струя приводит в движение внешнюю среду благодаря понижению статического давления при турбулизации течения. В слое смешения возникают области пониженного и повышенного давления. Внешняя среда последовательно эжектируется в области пониженного давления. В результате вычислительного моделирования нестационарных процессов в расширяющемся слое смешения струи получена визуализация динамики турбулентного течения и определены основные свойства процессов смешения и шумообразования. Возникновение звуковых колебаний происходит вне слоя смешения струи, в близи его границ. По результатам фазового анализа определена область, в которой гидродинамические пульсации приводят к образованию акустических возмущений: они наблюдаются с удалением от границы слоя смешения при значении поперечной координаты отсчитываемой от кромки сопла $y/d \geq 1.1x/d$. Это значение соответствует «внешней границе слоя смешения». Вне его происходит формирование звуковых волн. Полученные данные показывают, что область формирования акустического излучения имеет в разных сечениях струи протяженность порядка $(0.25 \div 0.3)$ длины волны.

Ключевые слова: слой смешения, эжекция, турбулентные пульсации, шумообразование.

NOISE SOURCES LOCATION IN A TURBULENT JET

S.IU. Krasheninnikov, L.A. Benderskiy

Central Institute of Aviation Motors, 2, Aviamotornaya Street, Moscow 111116, Russian Federation

E-mail: sykrasheninnikov@ciam.ru, labenderskiy@ciam.ru

Abstract: During subsonic jet flow from a nozzle generates a dynamic process with intense pulsating motion. The jet entrains the surrounding air due to the reduction of static pressure associated with flow turbulentization. Regions of decreased and increased pressure arise within the mixing layer. The surrounding air is successively entrained into the regions of reduced pressure. Computer modeling of unsteady processes in the expanding jet mixing layer allowed us to visualize

the turbulent flow dynamics and identified the key properties of mixing and noise generation. The generation of acoustic oscillations occurs outside the jet mixing layer, near its boundaries. Phase analysis revealed a region in which hydrodynamic pulsations lead to the formation of acoustic disturbances: these disturbances are observed with distance from the mixing layer boundary at a transverse coordinate measured from the nozzle edge $y/d \geq 1.1x/d$. This value corresponds to the outer boundary of the mixing layer. Sound wave formation occurs outside this region. The obtained results show that the region of acoustic wave formation has a characteristic extent in different jet cross-sections on the order of the acoustic wavelength.

Keywords: mixing layer, ejection, turbulent pulsations, noise generation

Введение

При стационарном истечении струи из сопла возникает нестационарный динамический процесс, сопровождающийся интенсивным пульсационным движением. В основном он сосредоточен в так называемом слое смешения. Указанный динамический процесс сопровождается турбулизацией потока, но его эволюция не является эволюцией турбулентности. В этом процессе энергия струи расходуется на приведение в движение окружающей среды. Струя приводит в движение внешнюю среду благодаря понижению статического давления при турбулизации течения [1]. А. Таунсенд определил связь величины понижения локального значения статического давления в слое смешения струи с интенсивностью пульсаций поперечной компоненты скорости:

$$\Delta p = \rho \left\langle v'^2 \right\rangle$$

Из-за наличия интенсивных пульсаций скорости в слое смешения возникает «разрежение»-понижение статического давления по отношению к внешней среде [1]. В результате осредненные локальные значения статического давления в слое смешения p ниже значения статического давления во внешней среде на эту (сравнительно небольшую) величину:

$$p = p_0 - \Delta p$$

Это в свою очередь создает эффект эжекции. В динамическом процессе распространения струи, который нестационарен, в слое смешения образуются области пониженного и повышенного давления, при выполнении приведенного соотношения «в среднем».

В работах [2,3] представлены результаты измерений характеристик пульсационного движения и данные вычислительных экспериментов по определению его свойств. В результате вычислительного моделирования нестационарных процессов в слое смешения струи на основе численного решения уравнений Навье-Стокса в нестационарной постановке (LES-технологии) получена визуализация динамики турбулентного течения в струе и определены основные свойства процессов смешения и шумообразования.

Образование акустических возмущений при распространении струи

Главный источник шума струй - крупномасштабные пульсации. Наглядными подтверждениями такого механизма является его соответствие экспериментальному определению положения источников шума на данной частоте и экспериментам по исследованию динамики крупномасштабных образований в турбулентных струях, а также результатам вычислительного моделирования шума турбулентных струй. Эксперименты и расчеты [3,4] показывают, что в слое смешения наблюдаются крупномасштабные неоднородности распределения параметров, продольное перемещение которых происходит со скоростью $u_c \approx 0.5u_0$, которую можно считать скоростью конвекции динамических неоднородностей.

На рис. 1 показаны результаты LES расчета течения при скорости на выходе из сопла $u_0 \cong 300 м/сек$, размер расчетной области составляет 40 диаметров сопла в продольном направлении и 23 диаметров сопла по радиусу от оси струи. Приведена «мгновенная» картина течения в осевой плоскости в слое смешения (он обозначен прямыми линиями) за срезом сопла с выделением линий тока. Зоны более низкого статического давления чем в окружающей среде показаны темным цветом, более высокого - светлым.

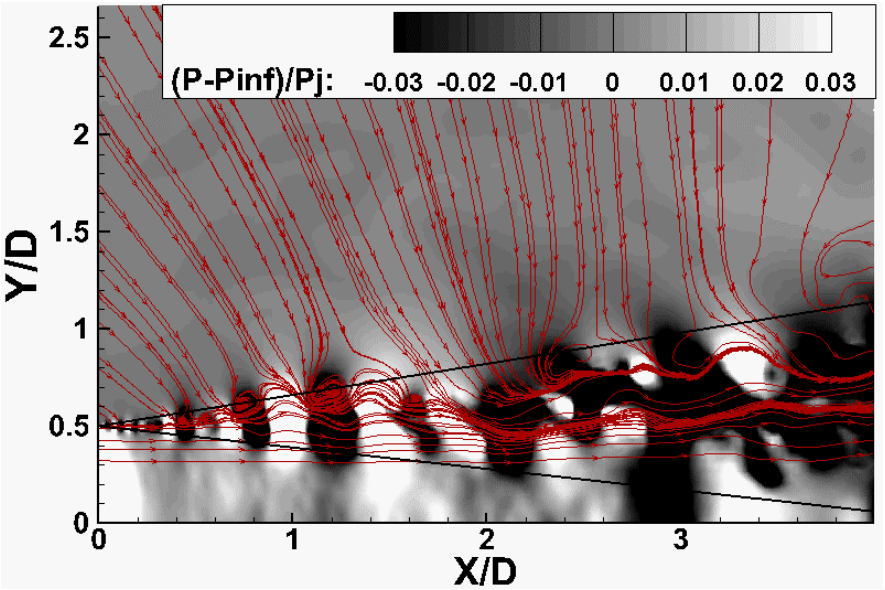


Рис. 1

Максимальный уровень разрежения в этих областях составляет около 20% от скоростного напора в начальном сечении струи. Эжектируемая внешняя среда огибает области повышенного давления и вовлекается в области пониженного давления [3]. При этом продольное движение областей повышенного и пониженного давления в самой струе создает квазипериодические колебания при втекании в струю. Период этого движения в каждом сечении струи соответствует определённой по опытным данным [2-4] зависимости частоты

звука, излучаемого отдельным участком струи, от продольной координаты $Sh = fd / u_0 = 1/55 d / x$.

С помощью фазового анализа пульсаций скорости и давления получена визуализация нестационарных процессов в струе и ее окрестности [3].

Согласно этим данным, возникновение звуковых колебаний происходит вне слоя смешения струи, вблизи границ струи. Это также подтверждается визуализацией процесса распространения возмущений на выделенных частотах из [1], показанного на рис.2-3, где приведены результаты вычислительного моделирования звукообразования на основе LES технологии и Фурье анализа для частоты, соответствующей *Sh*=1. На рис.2 приведены значения фаз пульсаций давления через 1/3 периода. Штриховыми линиями обозначены границы слоя смешения.

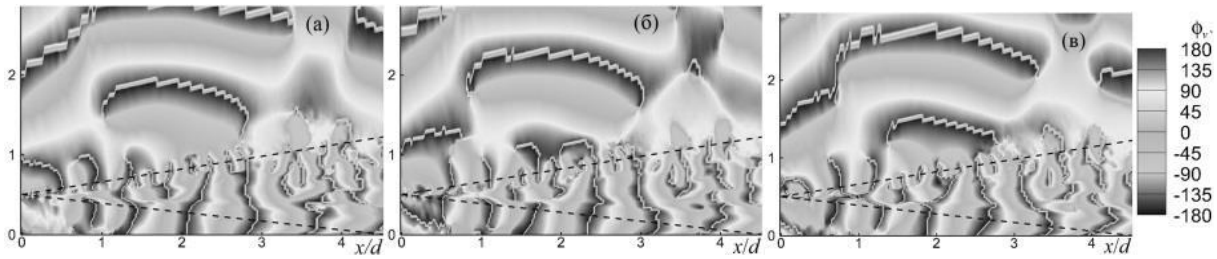


Рис.2

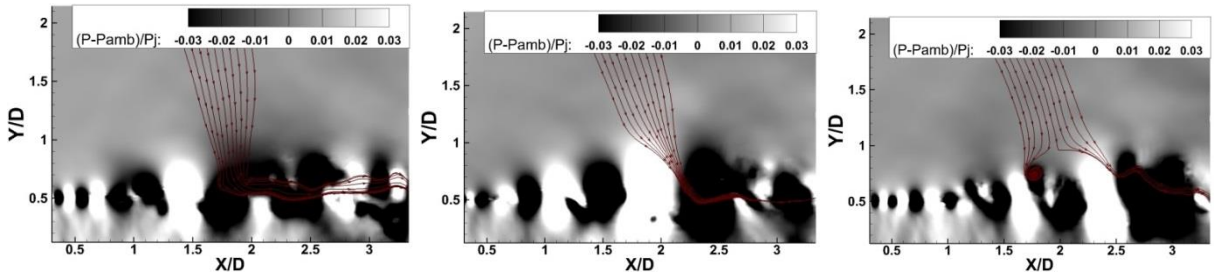


Рис. 3

Для сравнения на рис.3, также через 1/3 периода представлены «синхронные» результаты расчетов картины течения. Эти данные о процессе шумообразования турбулентных струй соответствуют идее М. Лайтхилла: «Турбулентные струи создают возмущения в окружающей среде, которые превращаются в звуковые волны» [5]. Первоначально, из-за крупномасштабных турбулентных пульсаций, в струе возникает нестационарное движение областей пониженного давления. Квазипериодическое движение этих областей, втягивающих в себя внешнюю среду, вызывает возмущения в движении эжектируемого потока. И уже эти возмущения превращаются в акустические, которые получают пульсационную энергию из-за возмущения втекающего потока дальнодействующими силами статического давления. Звуковые волны появляются вследствие крупномасштабных динамических процессов, происходящих в слое смешения и в непосредственной близости от

него. Это иллюстрируют данные представленные на рис.4, которые получены при расчетах, аналогичных данным рис.2. Показано распределение фаз пульсаций скорости и давления в поперечном сечении струи для *Sh*=1 (*x/d*=1.52) в фиксированный момент времени. По данным численного моделирования определялись «мгновенные» значения динамических параметров течения. По ним определены фазовые характеристики распространяющихся возмущений поперечной скорости *v* и давления *p* По результатам фазового анализа определена область, в которой гидродинамические пульсации производят акустические возмущения [1,3]. Совпадение фаз пульсаций скорости и давления соответствует звуковой волне. В данном случае оно наблюдается для пудьсаций компоненты *v* при *y/d* =1.1. Оно практически соответствует «внешней границе слоя смешения». При *y/d* меньшем 0.8, фазы пульсаций скорости и давления различаются более, чем на 90 градусов, то -есть распространяющиеся во вне возмущения отсутствуют, а формирование звуковой волны происходит в области, которая практически сразу начинается за условной внешней границей слоя смешения. На рис. 5 приведены картины течения с линиями тока втекания в струю, три момента времени за один период пульсационного движения. Приведена также схема с расположением условных границ его различных областей.

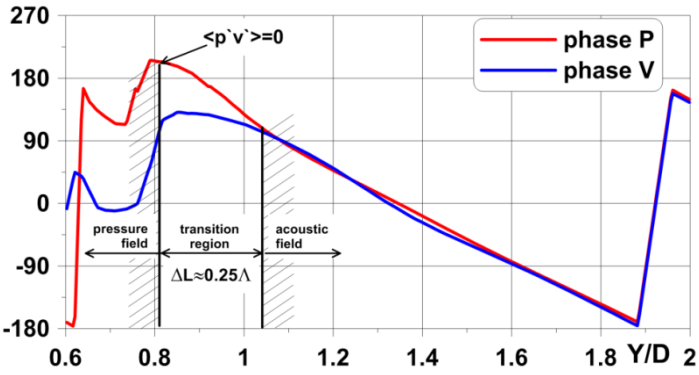


Рис. 4

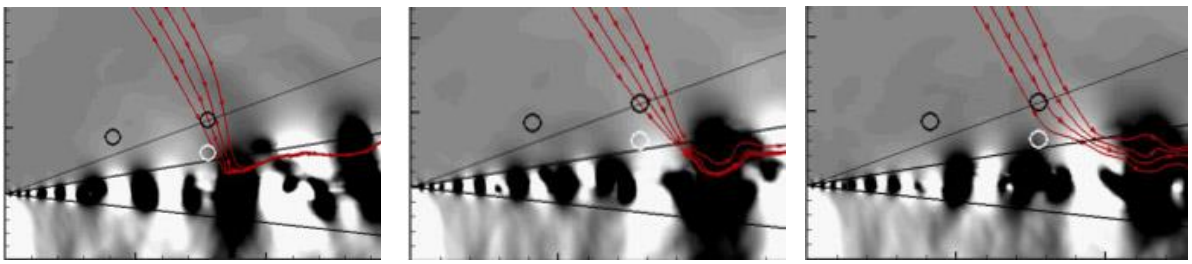


Рис.5

Кружками обозначены координаты характерных значений коэффициентов корреляции пульсаций поперечной скорости и давления $\langle p'v' \rangle$: темные- 1,светлый- 0 (см.рис.4). Можно наблюдать эволюцию - трансформацию и движение «объема» втекающей среды. Линии тока втекания совершают периодическое перемещение между двумя внешними границами, оставаясь практически неподвижными вне струи. Можно видеть, что внутри этой области происходит значительное ускорение и изменение направления втекающего потока при приближении к границе слоя смешения. В [1,6] показано, что при таком пульсационном

движении потока происходит образование акустических возмущений, как результат вихревого движения среды. Т.е. происходит «взаимодействие несжимаемого поля скорости с самим собой» (цитата из [6]), которое и является источником акустических возмущений.

Результаты проведенного анализа, в частности зависимости фазовых характеристик пульсационного движения от поперечной координаты (подобных рис.4) указывают на существование конкретной области, находящейся вне струйного течения, где происходит образование акустических возмущений. Это позволяет дополнить схему течения при смешении струи предложенную Г.Н. Абрамовичем [1]- (рис.6).

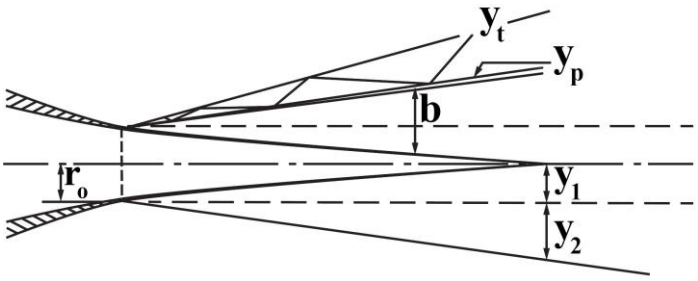


Рис. 6

Наряду с общепринятыми границами слоя смешения: внутренняя - $y_1 \cong 0.11x$ и внешняя- $y_2 \cong 0.16x$ появились две вновь установленные границы, показанные на рис.6: области пульсаций давления, в которой не обнаруживаются акустические пульсации $y_p \cong (0.17-0.18)x$ и области формирования акустических возмущений, которая находится между границами y_t и y_p (рис.6). За границей y_t находится область, которую можно назвать свободным акустическим полем, от границы y_t распространяются чисто акустические возмущения. Её положение зависит от скорости истечения струи, поскольку размер области, в которой происходит образование акустических возмущений зависит от частоты. Это обусловлено тем, что, согласно полученным данным по расчёту акустического излучения струи [2] и известным данным, в частности для закрученной струи [1], поперечный размер этой области пропорционален длине волны акустического возмущения Λ, которая связана со скоростью звука *a* и частотой пульсаций *f*.

Частота связана с периодом пульсационного движения T, который в каждом сечении струи определяется конвективной скоростью u_c и продольным масштабом пульсаций L. Периоды акустических и гидродинамических возмущений совпадают. Для акустических возмущений $T = 1/f = \Lambda / a$ или $\Lambda = aT$. Продольный масштаб возмущений в слое смешения $L = 0.385x$ [2.4]. С другой стороны $L = u_c T$, где скорость конвекции $u_c \cong 0.5u_0$

Исходя из совпадения частот и периодов акустических и гидродинамических пульсаций для фиксированного сечения струи получаем

$\Lambda = 2aL/u_0 \cong 0.75x/M_0$. ($M_0 = u_0/a$).

Согласно данным расчетов на рис.4-5, на рис.6 расстояние между границами областей $y_{тр} \cong 0.3x$. Оно получено согласно [3] при $M_0 \cong 0.9$. С учетом этого получаем приближенную зависимость для протяженности (по нормали к оси струи) области образования акустического возмущения для характерной частоты в рассматриваемых условиях её образования. Представленные данные показывают, что область формирования акустического излучения имеет протяженность от внешней границы слоя смешения порядка $(0.25 \div 0.3)\Lambda$. Это соответствует оценкам, сделанным в работе [1].

Заключение

Данные рис.1-3 иллюстрируют процесс образования звуковых волн при взаимодействии турбулентного движения жидкости с внешней средой. Они показывают, что первичным фактором является возникновение нестационарного распределения статического давления, имеющее квазипериодический характер.

Нестационарное поле статического давления вызывает такую же нестационарность подтекания вблизи границ струи. Этот динамический процесс соответствует закономерностям движения несжимаемой жидкости.

Следствием этого процесса является формирование акустических возмущений вне слоя смешения, их возникновение обусловлено квазипериодическим движением областей пониженного и повышенного давления, свойства которого близки к динамике несжимаемой жидкости.

Результаты проведенного анализа указывают на существование конкретной области, где происходит образование акустических возмущений, находящейся вне струйного течения. Это позволяет дополнить схему Г.Н. Абрамовича течения в слое смешения турбулентной струи.

Список литературы

1. *Крашенинников С. Ю.* // Турбулентные струи. Особенности динамики течений, процессов смешения и шумообразования. Государственный научный центр РФ «Центральный институт авиационного моторостроения имени П. И. Баранова». М., ЦИАМ, **124** с. (Труды ЦИАМ: № 1366), 2024.
2. *Крашенинников С. Ю., Миронов А. К., Бендерский Л. А.* // Акуст. журнал, 2018, **64**, № 6, С. 704.
3. *Бендерский Л.А., Крашенинников С.Ю., Миронов А.К.* // Изв. РАН, МЖГ. 2017, №6 С. **50**.
4. *Крашенинников С.Ю., Миронов А.К.* // Изв. РАН МЖГ 2010. № 3, с.69-83.
5. *Lighthill M.J.* // Proc. Roy. Soc. 1952. **221**, N 1107, P. 564.
6. *Монин А.С., Яглом А.М.* Статистическая гидромеханика. Механика турбулентности. Ч. 1. М., Наука, 1965. **640** с.

УДК: 536.75, 532.5, 533.723 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39545

Кинетический подход к описанию источников акустического излучения плоских вихревых систем

Чернышев С.А., Демьянов М.А., Копьев В.Ф.
ФАУ «ЦАГИ» НИЦ аэроакустики, ул. Радио 17, Москва, 105005 Россия

Нестационарные течения сжимаемого газа сопровождаются характерным акустическим излучением. При малых дозвуковых скоростях справедлива непосредственная связь между генерируемым звуковым полем и полем завихренности. Таким образом, для правильного описания акустических источников в потоке необходимо сначала понять особенности динамики вихревых образований. В соответствии с существующими представлениями о структуре турбулентных струйных течений, важную роль играет динамика отдельных сильных вихревых филаментов на фоне слабой средней завихренности. В таком случае можно попытаться моделировать в плоском слое смешения динамику филаментов, ответственных за генерацию акустического излучения, как газ точечных вихрей. При этом в предположении, что количество таких филаментов в слое смешения достаточно велико, применим аппарат кинетической теории, позволяющий описать динамику завихренности на макроуровне с учётом флуктуаций, связанных с “зернистостью” среды. Имеются основания полагать, что указанная схема позволит обосновать и правильно учесть вклад событий вихревой динамики в акустический шум сдвиговых течений. В данной работе приводятся результаты моделирования системы точечных вихрей, находящейся в близком к равновесному состоянии. На основе численного расчета определяются характеристики, ответственные за звуковое излучение вихревой системы. Производится сопоставление результатов расчета и разработанной теоретической моделью.

Ключевые слова: вихревая динамика, кинетическая теория, аэроакустические источники

Kinetic approach to the description of acoustic sources In plane vortex systems

S.A. Chernyshev, M.A. Demyanov, V.F. Kopiev

Central Aerohydrodynamic Institute (TsAGI) Research center of aeroacoustics. Moscow 105005, Russia.

Unsteady compressible gas flows are accompanied by characteristic acoustic radiation. At low subsonic speeds, there are direct relationships between the generated sound field and the vorticity field. Therefore, it is first necessary to understand the dynamics of vortex formations to correctly describe the acoustic sources in the flow. According to existing concepts of the structure of turbulent jet, the dynamics of individual strong vortex filaments against a background of weak average vorticity is essential. In this case, it makes sense to consider the dynamics of the filaments responsible for generating acoustic radiation in a plane mixing layer as a gas of point vortices. Assuming that the number of such filaments in the mixing layer is sufficiently large, kinetic theory can be applied to describe vorticity dynamics at the macroscopic level, taking into account fluctuations associated with the "granularity" of the medium. There is reason to believe that this model will allow us to justify and correctly calculate the contribution of vortex filament dynamics to the acoustic noise of shear flows. This work presents the results of modeling a system of point vortices in a near-equilibrium state. Based on numerical calculations, the characteristics responsible for the sound radiation of the vortex system are determined. The correspondence between the calculation results and the developed theoretical model is provided.

Keywords: vortex dynamics, kinetic theory, aeroacoustic sources.

PACS: 47.32.C−, 05.20.Dd, 43.28.−g.

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39546

Об излучении широкополосного шума сотовыми ЗПК под воздействием гидродинамических пульсаций давления в турбулентном пограничном слое

Остриков Н.Н.[1)], **Ипатов М.С.**[1)]

[1)]*ФАУ «ЦАГИ» НИЦ аэроакустики, ул. Радио 17, Москва, 105005 Россия*

E-mail: aeroacoustics@tsagi.ru

Анализ процесса затухания звука в каналах при наличии звукопоглощающих конструкций (ЗПК) на основе решения волнового уравнения с импедансными граничными условиями показывает, что затухание звука возникает вследствие деструктивной интерференции: податливая граница излучает звук в противофазе падающей волны. Отверстия лицевых перфорированных панелей сотовых ЗПК в каналах авиадвигателей испытывают воздействие сразу двух типов пульсаций давления, которые порождают в них поток: (1) акустического давления, генерируемого вентилятором двигателя, и (2) гидродинамического давления в турбулентном пограничном слое (ТПС). Тем самым, акустический отклик ЗПК на внешнее воздействие формируется в каналах двигателя двумя различными механизмами. В настоящей работе на основе полуаналитического решения модельных задач выполнена оценка уровней широкополосного шума, который генерируется сотовыми ЗПК конечной длины на стенках канала и в дальнем поле под воздействием пульсаций гидродинамического давления в ТПС. При этом было сделано предположение о некоррелированности гидродинамических пульсаций в соседних ячейках ЗПК, а уровни пульсаций давления в ТПС основывались на модели Б.М. Ефимцова. Расчеты в указанных предположениях показали близкие уровни собственного широкополосного шума ЗПК к уровням, измеряемым при статических испытаниях двигателей на стенках канала и в дальнем поле, причем на некоторых частотах наблюдается превышение расчетных над экспериментальными уровнями. Измерения, выполненные на установке «Интерферометр с потоком» с помощью аналога метода Дина, показали, низкую корреляцию пульсаций давления в ТПС в соседних ячейках ЗПК в поперечном направлении и достаточно высокую коррелированность пульсаций в продольном направлении. Таким образом, сделан вывод о важности исследованного эффекта для практических приложений и необходимости построения полуэмпирической модели гидродинамических пульсаций в ТПС на поверхности сотовых ЗПК.

Ключевые слова: Распространение звука в каналах с потоком, звукопоглощающие конструкции (ЗПК), турбулентный пограничный слой (ТПС)

On the emission of broadband noise by honeycomb liners under the influence of hydrodynamic pressure pulsations in a turbulent boundary layer

Ostrikov N.N.[1)], **Ipatov M.S.**[1)]
[1)]*Central Aerohydrodynamic Institute named after Professor N.E. Zhukovsky, Acoustic Dept., 17 Radio Street, Moscow, 105005 Russia*
E-mail: aeroacoustics@tsagi.ru

An analysis of the sound attenuation process in ducts in the presence of sound-absorbing structures (liners) based on the solution of the wave equation with impedance boundary conditions shows that sound attenuation occurs due to destructive interference: the malleable boundary emits sound in the opposite phase of the incident wave. The holes of the front perforated panels of honeycomb liners in the ducts of aircraft engines are affected by two types of pressure pulsations at once, which generate a flow in them: (1) acoustic pressure generated by the engine fan, and (2) hydrodynamic pressure in the turbulent boundary layer (TBL). Thus, the acoustic response of the liners to external influences is formed in the ducts of the engine by two different mechanisms. In the present work, based on the semi-analytical solution of model problems, the assessment of the levels of broadband noise generated by finite length honeycomb liners on the duct walls and in the far field under the influence of hydrodynamic pressure pulsations in the TBL is performed. The assumption was made about the uncorrelation of hydrodynamic pulsations in neighboring liners cells, and the levels of pressure pulsations in the TBL were based on the model of B.M. Efimtsov. Calculations under these assumptions have shown that the levels of the actual broadband liners noise are close to the levels measured on the ducts walls and in the far field during static tests of the engines, and at some frequencies there is an excess of the calculated above the experimental levels. Measurements performed at the “Interferometer with Flow” facility using an analog of the Dean method showed a low correlation of pressure pulsations in the TBL in neighboring liners cells in the transverse direction and a fairly high correlation of pulsations in the longitudinal direction. Thus, it is concluded that the studied effect is important for practical applications and that it is necessary to build a semi-empirical model of hydrodynamic pulsations in TBL on the surface of honeycomb liners.

Keywords: Sound propagation in channels with a flow, honeycomb liners, turbulent boundary layer

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39547

Использование фильтра типа Калмана для повышения точности извлечения импеданса звукопоглощающих конструкций при наличии воздушного потока

Денисов С.Л.[1)], **Ипатов М.С.**[1)]
[1)]*ФАУ «ЦАГИ» НИЦ аэроакустики, ул. Радио 17, Москва, 105005 Россия*
E-mail: aeroacoustics@tsagi.ru

В настоящее время установки типа «Интерферометр с потоком» активно используются для извлечения импеданса звукопоглощающих конструкций (ЗПК) как при наличии воздушного потока, распространяющегося в канале установки, так и при его отсутствии. Основным методом исследования является измерения распределения звукового давления при распространении в канале установки тональных (обычно, мультисинус) или широкополосных сигналов (например, МЛС-последовательность или линейный частотно-модулированный (ЛЧМ) сигнал). Основным достоинством широкополосных сигналов является возможность измерения импульсной функции установки и извлечения импеданса ЗПК в широком диапазоне частот, в то время как использование сигнала типа мультисинус, позволяет проводит только извлечение импеданса, причём для дискретного набора частот (обычно, не более 20). К сожалению, наличие воздушного потока, распространяющегося в канале установке, затрудняет непосредственное использование широкополосных сигналов из-за гидродинамических пульсаций давления в турбулентном пограничном слое, которые возрастают при увеличении скорости потока. Для преодоления этой проблемы предлагается использовать относящийся к рекурсивному типу фильтр Волд-Калмана (расширение фильтра Калмана на случай гармонических сигналов), который, применительно к ЛЧМ-сигналу, позволяет существенно уменьшить влияние паразитного шума на измеряемые уровни звукового давления, получать импульсную функцию установки и значения импеданса, совпадающие со значениями импеданса, полученными при воздействии мультисинуса на соответствующих частотах.

Ключевые слова: интерферометр с потоком, звукопоглощающие конструкции (ЗПК), фильтр Волд-Калмана

Application of the Kalman filtering to improve accuracy of impedance eduction for «interferometer with the flow» installations in case of tonal and chirp signals

Denisov S. L.[1], **Ipatov M. S.**[1]
[1)]*Central Aerohydrodynamic Institute named after Professor N.E. Zhukovsky, Acoustic Dept., 17 Radio Street, Moscow, 105005 Russia*
E-mail: aeroacoustics@tsagi.ru

Currently the "Interferometer with a flow" installation is actively used for the impedance of sound-absorbing structures (liners) eduction in case of presence of an air flow in the installation duct and in its absence. The main method of research is the measurement of the distribution of sound pressure in the installation duct by means of tonal (usually, multisine) or broadband signals (for example, MLS-signal type or Chirp-signal). The main advantage of broadband signals is the ability to measure the impulse response of the installation and the impedance eduction in a wide range of frequencies, while using a multisine signal allows impedance eduction only for a discrete set of frequencies (usually no more than 20). Unfortunately, the presence of the flow the installation makes it difficult to directly use broadband signals due to hydrodynamic pulsations in the turbulent boundary layer, which increase while flow velocity growth. To overcome this problem proposed a recursive Vold-Kalman filter (an extension of the Kalman filter for the case of harmonic signals), which, when applied to an Chirp-signal, significantly reduces the impact of parasitic noise during sound pressure level measurements, and provides an impulse response function and impedance values that match those obtained from a multisine signal at the corresponding frequencies.

Keywords: Interferometer with the flow, liners, Vold-Kalman filtering, Chirp signal, Impedance

УДК 534.213.4 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39548

О результатах расчета эволюции системы ударных волн и их модального состава в цилиндрическом канале с потоком при моделировании ЗПК во временной области

В.Е. Макаров [a], В.А. Шорстов [b]

ФАУ "ЦИАМ им. П.И. Баранова". Москва, ул. Авиамоторная 2

E-mail: [a]vemakarov@ciam.ru, [b]vashorstov@ciam.ru

В работе сопоставляются трансформации модального состава полей из ряда RANS расчетов во временной области, с его трансформациями обусловленными волновыми числами для цилиндрического канала с однородным потоком и заданным импедансом внешней границы. Основой для исходных возмущений служит система скачков уплотнения от модельного вентилятора. Они задаются на одной из границ расчетной области. Для RANS расчетов используется программа «ВиВ Трекер» собственной разработки совместно с известной моделью импедансного граничного условия во временной области на основе решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Темп затухания акустических возмущений оказался близок к темпу, вычисленному по волновым числам только на достаточном удалении от границы жесткой и импедансной стенок. Ближе к границе темп затухания оказался ниже чем рассчитанный по волновым числам, причем рассогласование оказалось разным для рассмотренных режимов.

Ключевые слова: звукопоглощающие конструкции, импеданс во временной области, система ударных волн, модальный состав, разрыв импеданса.

About the results of computation the evolution of the shock wave system and its modal composition in a cylindrical chanel with a flow with acoustic liner simulation in time domain

V.E. Mararov [a], V.A. Shorstov [b]

Central Institute of Aviation Motors, Moscow, Russia, Aviamotornaya st. 2

E-mail: [a]vemakarov@ciam.ru, [b]vashorstov@ciam.ru

The paper compares the transformations of the modal composition of fields from a number of RANS computations in the time domain with its transformations causes by wave numbers for a cylindrical chanel with uniform flow and impedance condition of the external boundary. The basis for the inital disturbances is the shock wave system from the model fan. It's set one of the boundaries of the computational domain. For RANS computations, the authors' program «V&W Tracker» was used in conjunction with the time domain impedance model based of solving a system of ordinary differential equations. The attenuation rate of acoustic disturbances turned out to be close to the rate calculated from the wave numbers only at a sufficient distance from the boundary of the rigid and impedance walls. Closer to the boundary the attenuation rate turned out to be lower than that calculated by wave number, and the mismatch turned out to be different for the régimes.

Keywords: acoustic liner, time-domain Impedance, shock wave system, modal composition, impedance gap

Введение

Для цилиндрического канала с однородным потоком и фиксированным импедансом на внешней границе цилиндра решение задачи о распространении достаточно малых, гармонических по времени возмущений может быть получено аналитически в виде линейной комбинации функций, именуемых модами. Для каждой моды оно представляется произведением с гармоническим множителем по углу, множителем на основе функций Бесселя по радиусу и экспоненциальным множителем по оси. Последний однозначно вычисляется по параметрам потока, целочисленным индексам моды и импедансу внешней границы [1]. В общем случае коэффициент при осевой координате умноженной на мнимую единицу является комплексным числом и его мнимая часть определяет темп экспоненциального затухания моды. Аналитическая связь между импедансом звукопоглощающей конструкции (ЗПК) используется как элемент при настройке ЗПК [2].

Для современных двигателей гражданских самолетов характерны рабочие колеса вентиляторов (РК) со сверхзвуковой скоростью периферийных частей лопаток на режимах «Взлет» и «Набор высоты». Соответствующее течение сопровождается появлением системы ударных волн, распространяющихся по каналу воздухозаборника вверх по потоку. Шум этой системы, во многом, определяет уровень шума самолета в целом, и не может оставаться без внимания при настройке ЗПК. При этом распространение системы скачков уплотнения не описывается через суперпозицию акустических мод из-за нарушения условий малости и гладкости возмущений. Примером может служить уменьшение амплитуды ударных волн в канале с жесткими стенками при удалении от РК, при том что основные компоненты модального состава такого поля имеют нулевую мнимую часть в осевом волновом числе, и не должны затухать. Еще одним ограничением применимости методов на основе модального состава является неосесимметричность осредненного по времени течения перед РЛВ. Она неизбежно вызывается наличием угла атаки набегающего потока и геометрической неосесимметрией канала воздухозаборника.

Методы основанные на численном решении нелинейных уравнений RANS во временной области учитывают нелинейные эффекты и работают с произвольной геометрией каналов, но постановка граничного условия для ЗПК значительно усложняется. Цель настоящей работы в сопоставлении трансформации модального состава акустических полей из ряда RANS расчетов во временной области с его трансформацией обусловленной волновыми числами в цилиндрическом канале с однородным потоком. Анализ различий при таком сопоставлении должен позволить точнее выбирать методы расчета при настройке системы шумоглушения двигателей гражданских самолетов. Все исходные поля настоящей работы получены с помощью программы [3] совместно с моделью ЗПК во временной области [4].

1 Постановка задачи о расчете во временной области

Расчетная область представляет собой кольцевой канал с внешним радиусом 0.784 м и втулкой 0.225 м. Втулка используется для исключения вырождения сетки на оси канала. Во всех расчетах текущей работы уровень акустического давления вблизи втулки более чем на 50 дБ ниже, чем на периферии, что сводит ее влияние к минимуму и позволяет использовать формулы для цилиндрического канала [1]. По осевой координате канал состоит из рабочей части и области демпфирования возмущений с длинами около полуметра. На ближайшей к РК границе задаются возмущения в виде полной неоднородности по углу поля из стационарного расчета РК работы [5], либо неоднородности в виде суперпозиции нескольких мод полного поля. Поле берется на значительном расстоянии 0.31 м от передних кромок лопаток РК для более точного соответствия условиям однородности среднего по времени потока в канале. Несмотря на то что решается нестационарная задача, по постановке, все поле периодично с периодом равным 2π деленным на количество лопаток РК, угловая координата однозначно связана со временем. Это дает возможность выполнить модальный анализ по мгновенному полю параметров для каждого сеточного сечения канала.

2 Рассмотренные расчетные случаи

Все расчеты текущей работы соответствовали вращению РК с угловой составляющей скорости на периферии 394 м/с. Рассматривалось 2 режима по расходу воздуха соответствующие осевому числу Маха в канале 0.583 и 0.607. Использовалось либо полное поле РК, либо поле состоящее из комбинации 3х первых радиальных мод для частоты следования лопаток РК (ЧСЛ) и 3х первых радиальных мод для 2ЧСЛ с уменьшенной в 10 раз амплитудой. Уменьшение амплитуды соответствующее 20 дБ проводилось чтобы рассмотреть решение более близкое к линейному и предотвратить формирование ударных волн из волнового пакета. При исходной амплитуде скачки уплотнения повторно формируются даже из одной первой радиальной моды на протяжении 1 - 1.5 длин ее волны , как показано на рис. 1.

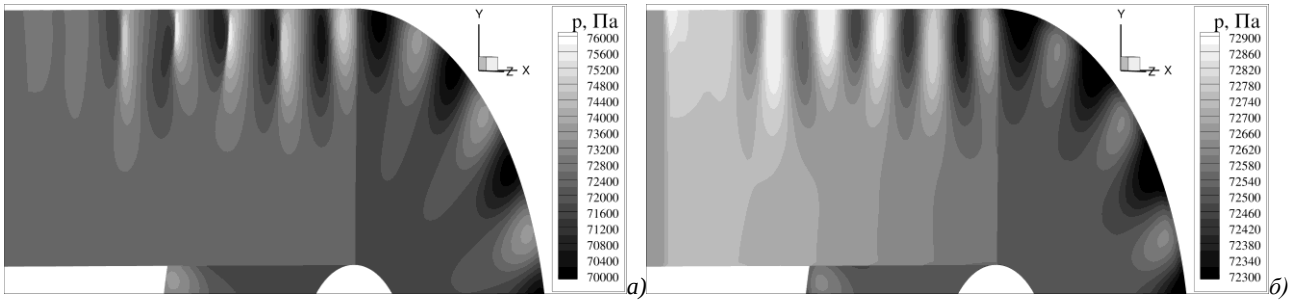


Рис. 1 Поле статического давления в канале при возмущении из одной моды на ЧСЛ исходной а) и уменьшенной в 10 раз б) амплитуд

Для каждого из случаев рассматривался вариант с жесткой стенкой и вариант с моделированием панели ЗПК занимающей всю стенку на удалении 0.465м от передних кромок РК и далее. Для каждого из режимов выбирался свой оптимальный импеданс [1], формирующий сдвоенную моду на ЧСЛ из двух младших радиальных мод.

Траектории изменения осевых волновых чисел (k_x) на ЧСЛ при изменении величины обратной импедансу от нуля до оптимальных значений проиллюстрированы на рис. 2. Мнимые части сдвоенных мод соответствуют уровням их затухания 69.9 дБ/м и 62.5 дБ/м для чисел Маха среднего потока 0.583 и 0.607 соответственно.

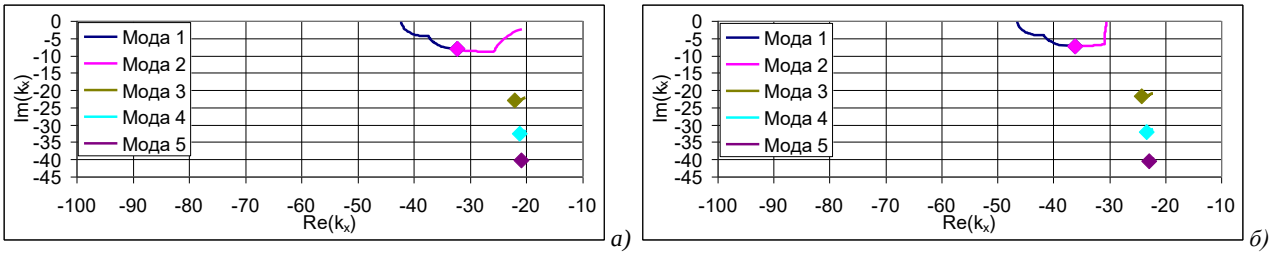


Рис. 2 Траектории изменения k_x на ЧСЛ при изменении величины обратной импедансу от нуля до оптимальных значений а) для потока с числом Маха 0.583 импеданс 3.67-1.82i, б) для потока с числом Маха 0.607 импеданс 4.42-1.96i

3 Анализ результатов расчетов

Все результаты представленные ниже получены обработкой мгновенного поля течения после расчета длиной в 4 полных оборота от установленного начального осесимметричного поля. Такого временного интервала было достаточно чтобы представленные параметры слабо завесили от времени расчета. Для получения разложения по времени использовалась однозначная связь между ним и угловой координатой следующая из постановки задачи. За редким исключением параметры даются на ЧСЛ. На рис. 3 и рис. 4 представлены результаты расчетов канала с жесткой стенкой при числах Маха потока 0.583 и 0.607. При относительно небольшом изменении числа Маха в канале и соответствующем изменении режима работы РК модальный состав возмущений меняется существенно.

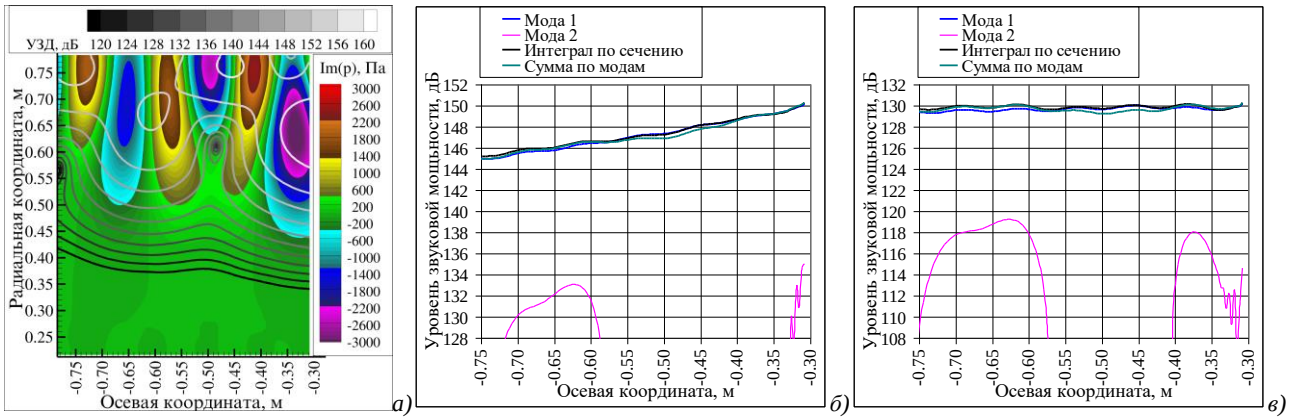
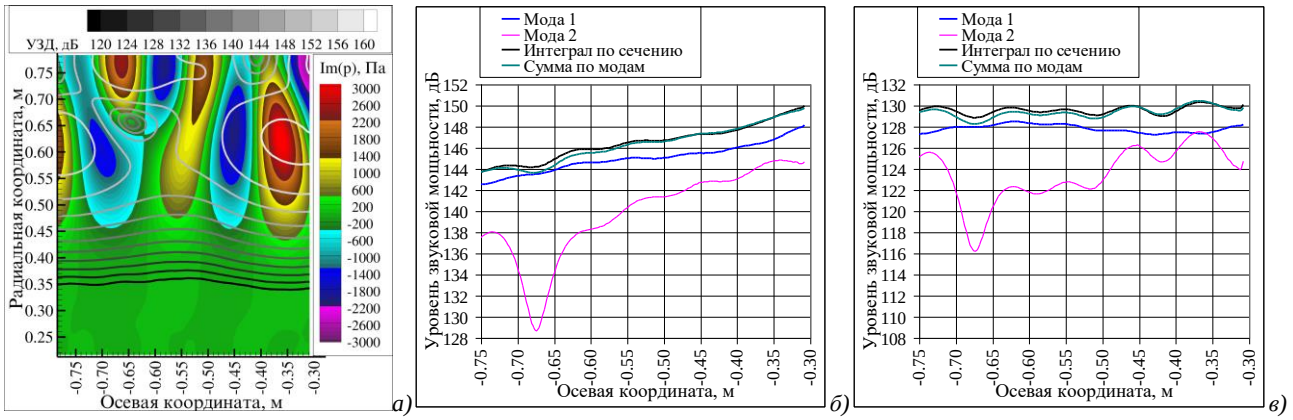


Рис. 3 При числе Маха в канале 0.583 поле мнимой части образа Фурье и изолинии УЗД на ЧСЛ для расчета с исходными возмущениями *а)*, изменение УЗМ суммарно и по модам на протяжении канала для расчета с исходными возмущениями *б)*, то же самое для расчета с возмущениями из шести мод с уменьшенной в 10 раз амплитудой *в)*.

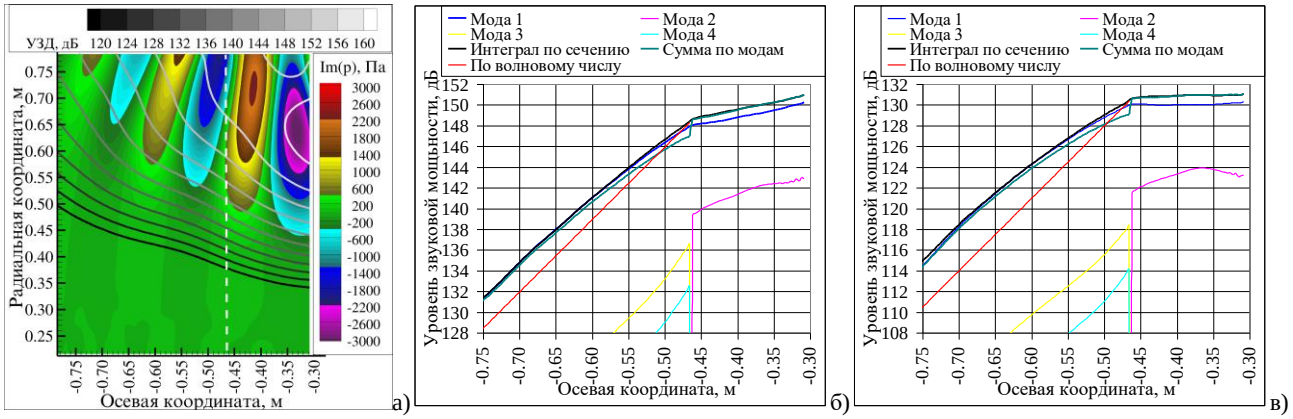
При числе Маха в канале 0.583 вторая радиальная мода находится на границе отсечки, заметно влияет на уровень звукового давления (УЗД) рис 3, *а* и не влияет на уровень звуковой мощности (УЗМ) рис 3, *б*, *в*.



а) *б)* *в)*

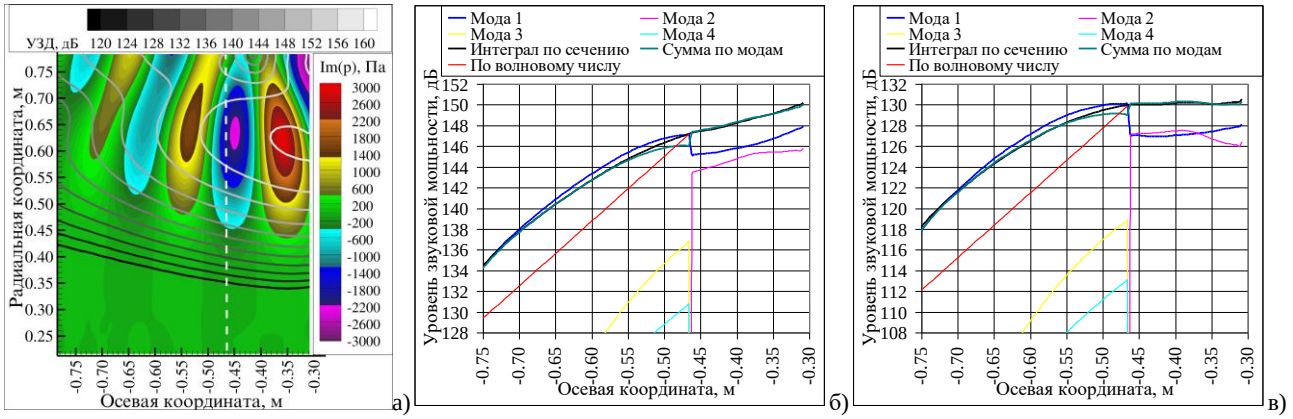
Рис. 4 То же что и на рис. 3 при числе Маха в канале 0.607

При числе Маха в канале 0.607 вторая радиальная мода доминирует в поле УЗД и вносит заметный вклад в УЗМ. В задачах с исходными возмущениями в виде систем ударных волн УЗМ ожидаемо затухает на 5-6 дБ за 0.45 м канала. В случае возмущений в виде суперпозиции мод уменьшенной амплитуды в канале с жесткими стенками затухания не происходит. Рис. 5, 6, аналогичные рис. 3,4 представляют расчеты с моделированием ЗПК.



а) б) в)

Рис. 5 То же что и на рис. 3 при числе Маха в канале 0.583, белый пунктир на а)- граница стенки и панели ЗПК



а) б) в)

Рис. 6 То же что и на рисунке 4 при числе Маха в канале 0.607, белый пунктир на а)- граница стенки и панели ЗПК

В области с жесткой стенкой во всех расчетах различие УЗМ с ЗПК и без ЗПК различимо, но менее 1дБ, что говорит о небольшом влиянии на УЗМ волн отраженных от разрыва импеданса вниз по потоку. Для суперпозиции мод рис. 5, а, 6, а затухание связано только с воздействием ЗПК. Темп затухания рассчитанный по волновым числам (красные прямые рис. 5, 6) достигается только на расстоянии 0.25 м от границы панели, что до 1.7 раза превышает осевые длинами волн младших мод. Снижение темпа затухания около границы ЗПК оказалось сильнее для режима с большим числом Маха. Сопоставление расчетов с исходной системой ударных волн и расчетов с суперпозицией мод уменьшенной амплитуды показывает, что снижение амплитуды связанное с ударными волнами и снижение амплитуды связанное с ЗПК в первом приближении складываются.

Заключение

Проведенные RANS расчеты совместно с моделью ЗПК во временной области показали, что темп затухания возмущений рассчитанный по волновым числам достигается только на расстояниях превышающих длину волны основной моды от границы панели ЗПК и жесткой стенки. В области примыкающей к границе темп затухания зависит от режима и гораздо ниже. Так же сопоставления результатов расчетов показали, что темпы затухания связанные со скачками уплотнения и воздействием ЗПК складываются в первом приближении.

Список литературы:

1. *А.Г. Мунин, В.М. Кузнецов, Е.А. Леонтьев.* Аэродинамические источники шума - Москва: Машиностроение, 1981.
2. *Остриков Н. Н.* О влиянии модального состава звукового поля и критериев настройки параметров ЗПК, устанавливаемых в каналах двигателя, на снижение шума самолета на местности / *Н. Н. Остриков, М. А. Яковец* // Сборник Трудов XXXIV сессии Российского акустического общества : Сборник трудов сессии, Москва, 14–18 февраля 2022 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Издательство ГЕОС", 2022. – С. 553-560. – DOI 10.34756/GEOS.2021.17.38128. – EDN MWDXPW.
3. *В. А. Шорстов* Программа для ЭВМ «Трекер вихрей и волн» («ВиВ Трекер»), свидетельство № 2022661092, 15.06.2022
4. *Dragna, D., Pineau, P., Blanc-Benon, P.*, “A generalized recursive convolution method for time-domain propagation in porous media,” J. Acoust. Soc. Am., Vol. 138, No. 2, 2015, pp. 1030–1042
5. *Шорстов, В. А.* Расчет генерации, распространения и излучения шума в системе «сверхзвуковой воздухозаборник - ротор первой ступени вентилятора» на режиме взлета / В. А. Шорстов // Математическое моделирование. – 2025. – Т. 37, № 5. – С. 77-95. – DOI 10.20948/mm-2025-05-05. – EDN VJJFMC.

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39549

Моделирование шума перепускного клапана противопомпажной системы с использованием LES и методов пониженного порядка на основе акустической аналогии

Карабасов С.А., Солнцев И.А.
ФАУ «ЦАГИ» НИЦ аэроакустики, Москва.

Перепускные клапаны противопомпажной системы (surge bleed valves – SBV) используются в газотурбинных двигателях на низкоскоростных режимах для отвода воздуха из компрессора в канал наружного контура низкого давления, чтобы избежать помпажа компрессора. На выходе SBV формируется недорасширенная сверхзвуковая струя. Для снижения образующегося шума применяются, например, перфорированные пластины, разделяющие основную струю на множество меньших сверхзвуковых струй, что смещает формирующийся ударно-волновой широкополосный шум в область более высоких частот. Дальше по течению множественные струи перемешиваются, образуя дозвуковую струю, излучающую шум на низких частотах, что делает моделирование течения и шума SBV многомасштабной задачей.
В настоящей работе рассмотрена обобщённая конфигурация SBV, повторяющая известный эталонный случай. Для вихреразрешающего моделирования течения и шума SBV применяется LES с моделью стенки (Wall-Modelled LES). В расчет LES полностью включена геометрия SBV. Расчёт выполнен с использованием LES-решателя CABARET на графических платах с последующим акустическим расчётом с помощью метода контрольных интегральных поверхностей (FW-H). На основе результатов LES предложен метод акустической аналогии пониженного порядка, включающий модель источника ударно-волнового шума и модель источника шума смешения струи, основанный на усреднённых по времени свойствах течения.

Ключевые слова: шум противопомпажной системы, ударно-волновой широкополосный шум, метод LES, схема CABARET, акустическая аналогия

Modeling of anti-pompage bypass valve noise using les and reduced-order methods based on acoustic analogy

S.A. Karabasov, I.A. Solntsev
Central Aerohydrodynamic Institute (TsAGI) Research center of aeroacoustics. Moscow 105005, Russia.

Surge bleed valves (SBVs) are used in gas turbine engines at low speeds to blowing out air from the compressor into the low-pressure outer duct to prevent compressor pompage. At the end of SBV outlet forms underexpanded supersonic jet. To reduce the resulting noise, for example, perforated plates are used to divide the main jet into multiple smaller supersonic jets, shifting the resulting shock-

wave broadband noise to higher frequencies. Downstream, the multiple jets mix, forming a subsonic jet that emits low-frequency noise, making SBV flow and noise modeling a multiscale problem.
In this paper, we consider a generalized SBV configuration that replicates a well-known etalon case. Wall-Modeled LES is used for high-eddy simulation of SBV flow and noise. The LES calculation fully incorporates the SBV geometry. The calculation was performed using the CABARET LES solver on graphics cards, followed by acoustic analysis using the Ffowcs-Williams-Hawkings (FW-H) method. Reduced-order acoustic analogy method based on the LES results that include a shock-wave noise source model and a jet mixing noise source model based on time-averaged flow properties is proposed.

Keywords: anti-pompage system noise, shock-wave broadband noise, LES method, CABARET scheme, acoustic analogy

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39550

Численное моделирование аэроакустических характеристик самолетных винтов с использованием собственного расчетного кода акустического отделения цаги

Титарев В.А.[1,2)], Фараносов Г.А.[2)], Акиньшин Р.В. [2)]
[1)] ФИЦ ИУ РАН, Москва;
[2)]ФАУ «ЦАГИ», Москва;

В последние годы для моделирования тонального шума винтов, в том числе двигателей с биротативным винтовентилятором (counter-rotating open rotor – CROR), установилась практика использования прямого численного расчета поля обтекания вблизи лопастей и оценки шума в дальнем поле по методу Фокса Вильямса-Хоукингса. В акустическом отделении ЦАГИ с целью решения данного класса задач, развивается собственный параллельный программный комплекс, основанный на решателе «Гербера» [2], в основе которого лежит неявный численный метод решения уравнений газовой динамики на произвольных неструктурированных многозонных расчетных сетках. В докладе дан краткий обзор возможностей кода «Гербера» по численному моделированию сложных винтовых конфигураций, включая конфигурацию CROR. Приводятся примеры верификации и валидации расчетного кода.

Работа выполнялась с использованием инфраструктуры Центра коллективного пользования “Высокопроизводительные вычисления и большие данные” (ЦКП “Информатика”) ФИЦ ИУ РАН (г. Москва). Валидация комплекса проводилась с использованием экспериментальных результатов, полученных на УНУ АК-2 ФАУ «ЦАГИ».

1. V.A. Titarev, S.A. Chernyshev, G.A. Faranosov. Numerical simulation of propeller aerodynamics and tonal noise using parallel code Gerbera // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling, 2025. V 40, № 4. P. 313-340.
2. G. Faranosov and V. Titarev. Tonal Mach wave radiation of a counter-rotating open rotor // Physics of Fluids. 2025. V. 37. P. 116118.

Ключевые слова: вычислительная аэроакустика, Гербера, шум винта, методы высокого порядка, неструктурированные сетки, параллельные вычисления, CROR

Numerical modeling of aeroacoustic characteristics of aircraft propellers using the in-hosue computation code of tsagi’ acoustic department

Titarev V.A.[1,2)], Faranosov G.A.[2)], Akinshin R.V. [2)]
[1)] FRC CSC RAS, Moscow;
[2)]TsaGI, Moscow;

In recent years, direct numerical calculation of the flow field near the blades and far-field noise estimation using the Fawcs Williams-Hawkings method has become a popular method for simulating

the tonal noise of propellers, including those of counter-rotating open rotor (CROR) engines. To address this class of problems, the TsAGI Acoustics Department is developing its own parallel software package based on the Gerbera solver [2], which is based on an implicit numerical method for solving gas dynamics equations on arbitrary unstructured multi-zone computational grids. This report provides a brief overview of the Gerbera code's capabilities for numerical modeling of complex propeller configurations, including the CROR configuration.

The research was carried out using the infrastructure of the Shared Research Facilities ‘High Performance Computing and Big Data’ (CKP ‘Informatics’) of Federal Research Center ‘Computer Science and Control’ of the Russian Academy of Sciences (www.frccsc.ru). Validation studies were conducted using measurements obtained using TsAGI ‘AC-2 Anechoic chamber with flow’.

1. V.A. Titarev, S.A. Chernyshev, G.A. Faranosov. Numerical simulation of propeller aerodynamics and tonal noise using parallel code Gerbera // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling, 2025. V 40, № 4. P. 313-340.
2. G. Faranosov and V. Titarev. Tonal Mach wave radiation of a counter-rotating open rotor // Physics of Fluids. 2025. V. 37. P. 116118.

Keywords: computational aeroacoustics, Gerbera, propeller noise, high-order methods, unstructured meshes, parallel computing, CROR.

УДК: 534.32. DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39551

Аэроакустика легких винтовых самолетов

П.А. Мошков[1,a]

[1] *Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 125993, Москва, Волоколамское шоссе, 4*
E-mail: [a]*moshkov89@bk.ru*

Аннотация: Рассмотрена проблема шума легких винтовых самолетов на местности. Актуальность проблемы заключается в необходимости получения сертификата типа по шуму на местности на современные проектируемые в Российской Федерации самолеты малой авиации, которые в ближайшие годы должны прийти на смену самолетам типа Ан-2, Як-18Т и Л-410. Проблемы аэроакустики для легких винтовых самолетов рассмотрены по следующим основным направлениям: нормирование шума, конкурентные уровни шума, а также методы расчета шума в рамках процесса аэроакустического проектирования легкого винтового самолета.

Ключевые слова: аэроакустика, легкий винтовой самолет, шум на местности.

Aeroacoustics of light propeller-driven aircraft

P.A. Moshkov[1,a]

[1] *Moscow Aviation Institute (National Research University), 4 Volokolamskoe Sh., Moscow, 125993, Russia.*
E-mail: [a]*moshkov89@bk.ru*

Abstract: Abstract: The problem of community noise from light propeller-driven aircraft is considered. The relevance of the problem lies in the necessity of obtaining a type certificate for community noise for modern light aircraft being designed in the Russian Federation, which in the coming years are expected to replace aircraft such as the An-2, Yak-18T, and L-410. Aeroacoustic problems for light propeller-driven aircraft are examined in the following main areas: noise regulation, competitive noise levels, as well as methods for calculating noise within the framework of the aeroacoustic design process for a light propeller-driven aircraft.

Keywords: aeroacoustics, light propeller-driven aircraft, community noise.

PACS: 43.28.-g

Введение

Актуальность проблемы аэроакустики легких винтовых самолетов (ЛВС) заключается в необходимости получения сертификата по шуму на местности на современные проектируемые в Российской Федерации (РФ) самолеты для малой авиации, которые

должны прийти на смену самолетам Ан-2, Як-18Т и Л-410. Это самолеты «Байкал», «Танго» и «Освей», соответственно. В процессе эксплуатации ЛВС возможна их модификация, что также приводит к необходимости проведения процедур акустической сертификации [1, 2].

Развитие малой авиации неизбежно приводит к существенному изменению приоритетов в изучении проблемы аэроакустики [3]. Среди основных вех развития следует отметить широкое применение композиционных материалов, снижающих массу конструкции и позволяющих беспрепятственно реализовывать основные методы снижения уровней шума, такие как увеличение числа лопастей воздушного винта и установка глушителей шума выхлопа [4], а также начало применения электрических двигателей и гибридных силовых установок (СУ) [5].

Целью работы является анализ современных проблем аэроакустики ЛВС и выработка концептуальных предложений, обеспечивающих комплексное развитие данной тематики в РФ.

1 Хронология изменения нормативных требований по шуму ЛВС на местности

Предельно допустимые уровни шума современных ЛВС регламентируются в соответствии с главой 10 Стандарта ИКАО [6]. Отечественные нормы летной годности НЛГ 36 [7] полностью гармонизированы со Стандартом ИКАО, а в ГОСТ 23023-85 [8] указано, что стандарт соответствует требованиям Стандарта ИКАО.

Единицей оценки уровня шума ЛВС на местности является корректированный по шкале А стандартного шумомера (при замедленной реакции) максимальный суммарный уровень шума в диапазоне частот 45–11200 Гц, который соответствует диапазону третьоктавных полос частот 50–10000 Гц (OASPL, дБА).

Впервые решение о нормировании уровней шума ЛВС на местности было принято 3 августа 1974 г., а применяться данные требования стали с 27 февраля 1975 г.

При акустической сертификации ЛВС новая глава 10 стала применяться с 17 ноября 1988 г., и основными отличиями данной главы относительно ранее действующих норм стало изменение режима полета и режима работы СУ, контрольной точки на местности и способа расположения измерительного микрофона. При этом требования ГОСТ 23023-85 фактически оставляют необходимость выполнения измерений уровней шума ЛВС на режимах горизонтального крейсерского полета и фактически включает в себя требования глав 6 и 10 одновременно.

Основные принципиальные моменты - это изменение режима полета ЛВС с горизонтального крейсерского полета на взлетный, изменение способа установки микрофона с высоты 1,2 м до уровня 7 мм над земной поверхностью, а также корректировка

максимальной взлетной массы. При этом в ГОСТ 23023-85 в настоящее время указана масса 5700 кг и 6500 кг при модификации ЛВС, если масса прототипа была не более 5700 кг при первичной акустической сертификации. Современные ЛВС – это самолеты с максимальной взлетной массой менее 8618 кг.

При акустической сертификации современных одно- и двухдвигательных ЛВС, в отношении которых заявка на сертификат типа подана 17 ноября 1988 г. и позже, применяются максимальные уровни шума, указанные в п 10.4a главы 10 Стандарта ИКАО. На самолеты однодвигательные модифицированных вариантов, в отношении которых заявка на сертификат типа была подана 4 ноября 1999 года и позже, распространяются требования п.10.4.b.

Важно отметить, что ГОСТ 23023-85 с 1 января 1990 г. рекомендует ужесточение норм на 5 дБА для горизонтального пролета ЛВС. Это важный аспект, который в дальнейшем можно учитывать при формулировании понятия малошумного ЛВС на современном этапе развития тематики.

2 Конкурентные уровни шума и понятие «малошумный ЛВС»

При проектировании современного или перспективного ЛВС разработчики должны сформулировать для себя целевые показатели по шуму на местности. При формулировании таких показателей необходимо ориентироваться на требования главы 10 стандарта ИКАО, а также требования конкурентоспособности ЛВС, заключающиеся в анализе рынка аналогичных эксплуатируемых самолетов, которые уже прошли процедуру акустической сертификации, и информация об их уровнях шума доступна в открытом доступе. Отметим, что некоторые ЛВС, сертифицированные по шуму на местности, не имеют в целом запаса, их уровень шума равен предельному значению в соответствии с требованиями главы 10.

Нормативные и конкурентные уровни шума ЛВС и рекомендуемый критерий малошумного ЛВС рассмотрены в таблице 1. Отметим, что диапазон взлетных масс менее 600 кг для двухдвигательных ЛВС не рассматривается ввиду нецелесообразности проектирования таких самолетов.

Для одно- и двухдвигательных ЛВС, в отношении которых заявка на сертификат типа подана 17 ноября 1988 года и позже, применяются максимальные уровни шума, указанные в п 10.4a главы 10 Стандарта ИКАО. На однодвигательные ЛВС модифицированных вариантов, в отношении которых заявка на сертификат типа была подана 4 ноября 1999 г. и позже, распространяются требования п.10.4.b. Т.е. для однодвигательных модифицированных вариантов ЛВС требования главы 10 более жесткие и зависят от

взлетной массы. До ≈600 кг требования ужесточаются на 6 дБА, в диапазоне ≈600-1400 кг на 4,5 дБА, а для более тяжелых самолетов на 3 дБА.

Таблица 1

Нормативные и конкурентные уровни шума и рекомендуемый критерий для понятия «малошумный ЛВС»

Однодвигательные ЛВС			
MTOW – максимальная взлетная масса в 1000 кг	0÷0.57	0.57÷1.5	1.5÷8.618
Уровень шума в соответствии с требованиями п.10.4b, дБА	70	78.71+35.7 log *MTOW*	85
запас средний, дБА	5	6	9.5
запас максимальный, дБА	12.9	19	20.1
средний запас по всем ЛВС, дБА	7.5		
Конкурентный уровень шума, дБА	65	72.71+35.7 lg *MTOW*	75.5
Малошумный ЛВС, дБА	60	67.71+35.7 lg *MTOW*	70.5
Двухдвигательные ЛВС			
MTOW – максимальная взлетная масса в 1000 кг	0÷0.6	0.6÷1.4	1.4÷8.618
Уровень шума в соответствии с требованиями п.10.4a, дБА	76	83.23+32.67 lg*MTOW*	88
запас средний, дБА	–	8.5	6
запас максимальный, дБА	–	20.1	20
средний запас по всем ЛВС, дБА	–	7.5	
Конкурентный уровень шума, дБА	–	74.73+32.67 lg*MTOW*	82
Малошумный ЛВС, дБА	–	69.73+32.67 lg*MTOW*	77

В таблице 1 представлены средние и максимальные запасы по шуму на местности для самолетов, входящих в базу данных сертификационных испытаний EASA. Относительно средних величин запасов сформулированы конкурентные уровни шума ЛВС для одно- и двухдвигательных самолетов.

Предлагаемые конкурентные уровни шума в данном случае представляются оптимальными ввиду следующих обстоятельств:

– Снижение уровней шума в 6 дБА соответствует уменьшению звукового давления в 2 раза. Такого снижения уровня шума достаточно, чтобы говорить о проектировании нового поколения менее шумных ЛВС.

– Ориентируясь на максимальные величины запаса по уровням шума (около 20 дБА) надо учитывать уровни готовности технологий снижения шума и стоимость их внедрения на проектируемом самолете. В частности, аэроакустическая оптимизация формы лопасти может

не принести существенного снижения шума двух- и трехлопастных воздушных винтов, однако является сама по себе сложным и дорогостоящим процессом.

Дополнительное снижение уровня шума на 5 дБА относительно конкурентных уровней шума можно рассматривать, как критерий малошумности ЛВС. Данная величина согласуется с рекомендациями ГОСТ 23023-85 по ужесточению требований норм, а также согласуется с ужесточением требований главы 10 к модифицированным однодвигательным ЛВС. Дополнительно стоит отметить, что с шагом 5 дБА нормируются уровни шума в салонах самолетов для разных типов и классов салонов согласно ГОСТ 20296-2014 [9]. Таким образом, величина снижения уровня шума на 5 дБА относительно конкурентного уровня шума представляется обоснованным критерием малошумности ЛВС (таблица 1).

На основании вышеизложенного можно предложить понятие малошумного ЛВС. Малошумный ЛВС – это самолет, сертифицированный по шуму на местности с запасом 10-14,5 и более дБА относительно требований действующих норм главы 10 стандарта ИКАО в зависимости от числа двигателей и максимальной взлетной массы.

3 Краткое описание методологии аэроакустического проектирования ЛВС

Проблема аэроакустического проектирования ЛВС, т.е. проектирования с учетом целевых показателей по шуму на местности подробно рассматривалась автором в работах [2, 10]. В настоящее время установочные эффекты можно не учитывать только при оценке и снижении шума ЛВС, в состав СУ которых входит поршневой двигатель без глушителя. В этом же случае можно не учитывать также и шум обтекания элементов планера. Во всех остальных случаях учет установочных эффектов представляется обязательным при аэроакустическом проектировании ЛВС. Шум двигателя можно не учитывать, когда в состав СУ входят турбовинтовые и электрические двигатели.

На этапе технического предложения целесообразно оценивать уровень шума ЛВС на местности на базе инженерного метода [11], учитывающего основные источники шума и построенного на базе доступных для начального этапа проектирования общих технических характеристик СУ и ЛВС. На эскизном проекте в конструкции ЛВС предусматривается широкая вариативность при ограниченном количестве исходных данных для моделирования акустических характеристик, и поэтому численное моделирование представляется нецелесообразным. Начиная с технического проекта учет установочных эффектов [11] становится обязательным.

Заключение

Систематизирована хронология изменения нормативных требований по шуму на местности ЛВС. Последний раз требования по шуму на местности обновлялись в 1999 г. после введения главы 10 стандарта ИКАО. При этом первоначальные нормы (главы 6)

начали действовать с 1975 г. Согласно информации, представленной на сайте EASA обсуждения по обновлению стандарта ИКАО в части нормирования шума ЛВС уже инициированы, и обновление требований можно ожидать в ближайшие годы (до 2030 г.).

Предложено и обосновано понятие «малошумного ЛВС». Малошумный ЛВС – это самолет, сертифицированный по шуму на местности с запасом 10-14,5 и более дБА относительно требований действующих норм главы 10 стандарта ИКАО в зависимости от числа двигателей и максимальной взлетной массы.

Представлено краткое описание предлагаемой автором методологии аэроакустического проектирования ЛВС в части использования различных расчетных методов в зависимости от этапа проектирования.

Ужесточение требований норм стандарта ИКАО, существенная трансформация звукового поля ЛВС за счет применения электрических и гибридных СУ, широкое использование классических методов снижения уровней шума ЛВС – увеличение числа лопастей и установка глушителей шума выхлопа поршневого двигателя, обосновывают необходимость учета аэроакустических эффектов в реальных компоновках при проектировании современных и перспективных ЛВС.

Список литературы

1. *Погосян М.А., Мошков П.А.* Современные проблемы аэроакустики винтовых летательных аппаратов самолётного типа // Дин. и вибр. 2023. **9**. № 1. С. 6-15.
2. *Мошков П.А., Самохин В.Ф.* Проблемы проектирования легких винтовых самолетов с учетом требований по шуму на местности // Вестник МАИ. 2021. **28**. № 1. С. 19-34.
3. *Мошков П.А.* Системный подход как основа проектирования легких винтовых самолетов с требуемым уровнем шума на местности // НТВП. 2026. № 2. С. 82-84.
4. *Мошков П.А.* Оценка влияния различных параметров на шум легкомоторного самолета на основе положений стандарта ИКАО // Noise theory pract.. 2025. **11**. № 4 (43). С. 48-64.
5. *Moshkov P., Toropylina E.* Assessment of the use of electric power plants on the propeller-driven aircraft noise // AS. 2023. **6**. No. 1. pp. 101-106.
6. Международные стандарты и рекомендуемая практика. Приложение 16 к Конвенции о международной гражданской авиации. Охрана окружающей среды. **1**. Авиационный шум. Изд. 8. 2017.
7. Нормы летной годности. Сертификация воздушных судов по шуму на местности. НЛГ 36. Федеральное агентство воздушного транспорта, – 2022. – 6 с.
8. ГОСТ 23023-85. Самолёты винтовые лёгкой весовой категории. Допустимые уровни шума, методы определения уровней шума, создаваемого на местности. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам. 1985. – 16 с.
9. ГОСТ 20296-2014. Самолеты и вертолеты гражданской авиации. Допустимые уровни шума в салонах и кабинах экипажа и методы измерения шума: межгосударственный стандарт. – М: Стандартинформ, 2014. - 12 с.
10. *Moshkov P., Pogosyan M.* The concept of acoustic design of propeller-driven fixed-wing aircrafts // E3S Web of Conferences. HSTD. 2023. No. 01006.
11. *Мошков П.А.* Метод быстрого прогноза уровня шума легкого винтового самолета на местности // НТВП. 2026. № 1. С. 27-29.
12. *Копьев В.Ф., Остриков Н.Н., Фараносов Г.А., Титарев В.А., Денисов С.Л., Акиньшин Р.В.* О механизме боковой асимметрии излучения шума воздушного винта, установленного вблизи крыла // АЖ. 2024. **70**. № 5. С. 692-709.

УДК: 534.2 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39552

Экспериментальное исследование особенностей отражения ЛЧМ-посылки вращающимся винтом

Князева К.С.[1,a], Шуруп А.С.[1,b]

[1] *МГУ им. М.В. Ломоносова, Физический факультет, Москва, 119991.*

E-mail: [a]knyazevaks05@gmail.com, [b] shurup@physics.msu.ru

Аннотация: В [1] рассматривались особенности формирования корреляционной функции (КФ) излученного линейно частотно-модулированного (ЛЧМ) сигнала с сигналом, отраженным от вращающегося винта. Так как коэффициент отражения от винта меняется периодически, в спектре отраженного сигнала возникает мультиплет $f(t) \pm 2m/T$, $m \in \mathbb{Z}$, где $f(t)$ – мгновенная частота посылки, T – период коэффициента отражения (зависит от периода обращения винта и идентичности лопастей). В результате, КФ имеет основной пик, соответствующий времени распространения сигнала от излучателя до винта и обратно, а также ряд дополнительных пиков, в том числе, в области отрицательных задержек. Наличие максимумов КФ в области отрицательных временных задержек является новым информативным признаком, который может быть полезным в задачах обнаружения и идентификации вращающегося винта. В [1] дается обоснование метода и результаты лабораторных экспериментов. В данной работе мы представляем результаты натурного эксперимента, проведенного в 2021 г.

Ключевые слова: вращающийся винт, корреляционный анализ, ЛЧМ-сигнал

Список литературы

1. *Корольков А.И., Князева К.С., Шуруп А.С.* Теоретические и экспериментальные исследования корреляционных характеристик сигналов, отраженных вращающимся винтом. // Акустический журнал. 2020. **66**, N 6. P. 681-689.

EXPERIMENTAL STUDY OF FEATURES OF LFM-SIGNAL REFLECTED FROM A ROTATING PROPELLER

Kniazeva K.S.[1,a], Shurup A.S.[1,b]

[1] *Department of Acoustics, Faculty of Physics, M.V. Lomonosov Moscow State University, 119991, Russia.*

E-mail: [a]knyazevaks05@gmail.com, [b] shurup@physics.msu.ru

Abstract: In [1], the correlation function (CF) between the radiated Linear Frequency Modulated signal (LFM) and the reflected one from a rotating propeller is studied. Since the reflection coefficient for a propeller is periodical, the spectrum of the reflected signal contains a set of peaks at $f(t) \pm 2m/T$, $m \in \mathbb{Z}$, where $f(t)$ denotes the instant frequency of the radiated signal, T is time period of the reflection coefficient (it depends on the rotation period of the propeller and the identity of its blades). As a result, CF has the main peak associated with the time of back-and-forth propagation of the signal, and a number of additional peaks including the ones in the region of negative time delays. Presence of the peaks of the CF in the negative time delays region is a new informative criterion for location and identification of a rotating propeller. The method was introduced and justified with laboratory experiments in [1]. Here we discuss the results of a full-scale experiment carried out in 2021.

Keywords: rotating propeller, correlation analysis, LFM

1. *Korolkov A.I., Knyazeva K.S., Shurup A.S.* Theoretical and experimental studies of the correlation characteristics of signals reflected by a rotating propeller. // Acoustical Physics. 2020. **66**, N 6. P. 676-682.

PACS: 43.20.Fn, 43.60.Bf

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39553

Влияние выступающих элементов конструкции на поле пристеночных пульсаций давления в турбулентном пограничном слое

Кузнецов С.В., Голубев А.Ю.
ФАУ «ЦАГИ», НИЦ аэроакустики, ул. Радио 17, Москва, 105005 Россия

Пристеночные пульсации давления в турбулентном пограничном слое являются источником шума, создаваемого обтекаемыми потоком упругими конструкциями. Наличие выступающих элементов на обтекаемой поверхности приводит к отрыву пограничного слоя, в результате чего существенно возрастает интенсивность турбулентных пульсаций, а также происходит трансформация пространственно-временной структуры поля пристеночных пульсаций давления. В данной работе представлено обобщение полученных в ЦАГИ результатов по экспериментальному определению статистических характеристик полей пристеночных пульсаций давления в окрестности и на поверхности выступающих тел в турбулентном пограничном слое. Демонстрируется связь между физическими особенностями осредненного течения и полем пристеночных пульсаций давления, проявляющаяся в зависимости спектральных характеристик от размеров областей возвратного течения. Показано, что в случае тел обтекаемой формы наиболее интенсивные пульсации наблюдаются в зоне отрыва набегающего турбулентного пограничного слоя перед препятствием. Для плохообтекаемых тел характерно смещение максимума пульсаций ниже по течению в область отрыва потока с поверхности препятствия, а также в зону присоединения оторвавшего слоя смешения.

Ключевые слова: пульсации давления, отрывное течение, турбулентный пограничный слой

Influence of protruding design elements on the wall pressure fluctuation fields in the turbulent boundary layer

Kuznetsov S.V., Golubev A.Yu.
Central Aerohydrodynamic Institute (TsAGI) Research center of aeroacoustics. Moscow 105005, Russia

Wall pressure fluctuations in the turbulent boundary layer are a source of noise generated by elastic structures exposed to the flow. Presence of protruding elements on the streamlined surface leads to the boundary layer separation, resulting in a substantial increase in the turbulent fluctuation intensity alongside with a transformation of the space-time structure of the wall pressure fluctuation field. The current work presents a generalization of the results, acquired in TsAGI, on the experimental

determination of the statistical properties of the wall pressure fluctuation fields in the vicinity and on the surface of protruding bodies in the turbulent boundary layer. A connection between physical features of the mean flow and the wall pressure fluctuation field in demonstrated, that reveals itself in the dependency of the spectral properties on the reversed flow region dimensions. It is shown that in case of streamlined bodies the most intense fluctuations are recorded in front of the obstacle in the region of the incoming turbulent boundary layer separation. Bluff bodies are characterized with the fluctuation maximum shift in the downstream direction into the region of the flow separation from the body surface as well as into the region of the separated shear layer reattachment.

Keywords: pressure fluctuations, separation flow, turbulent boundary layer
PACS: 47.27.nb.

УДК: 534.222.1, 004.94. DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39554

Расчет акустических характеристик пропеллера в ПК FlowVision

А.А. Аксенов, А.В. Радостин, А.В. Февральских

ООО Тесис, Москва, ул. Юннатов, 18.

E-mail: radostin@flowvision.ru

Аннотация: Представлены результаты апробации новых возможностей программного комплекса FlowVision для выполнения аэродинамических и акустических расчетов на примере тонального шума пропеллера APC Slow Flyer 10 x 4.7. Определены аэродинамические характеристики одиночного пропеллера, на их основе записан источник для акустического уравнения, позволяющего воспроизвести распространение акустических волн на соответствующей сетке, как в случае одного, так и для нескольких подобных источников.

Ключевые слова: шум винта, вращающийся источник, распространение, моделирование.

Calculation of the acoustic characteristics of a propeller in the FlowVision PC

A.A. Aksenov, A.V. Radostin, A.V. Fevralskikh

Tesis LLC. 18, Yunnatov St. Moscow, Russia.

Abstract: The paper presents the results of testing the new features of the FlowVision software package for performing aerodynamic and acoustic calculations using the example of the APC Slow Flyer 10 x 4.7 propeller's tone noise. The aerodynamic characteristics of a single propeller have been determined, and data for an acoustic equation source has been stored to reproduce the propagation of acoustic waves on a corresponding grid, both for a single source and for multiple sources.

Keywords: propeller noise, rotating source, propagation, modeling.

PACS 43.28.−g

Введение

Резкий рост использования беспилотных летательных аппаратов в различных сферах жизни порождает необходимость создания методик исследования их шумовых характеристик методами вычислительной гидродинамики. Эти методики позволяют эффективно прогнозировать характеристики аппаратов на стадии проектирования, что в последствии

приведет к существенной экономии материальных ресурсов [1, 2]. Для решения подобных задач имеются отечественные программные комплексы, в основном исследовательские, такие как “Гербера” (ЦАГИ) [3], NOISETTE (ИПМ РАН) [4] и другие. Акустические характеристики в дальнем поле в этих ПК вычисляются применением по методу Фокса Вильямса-Хоукингса (FWH). В ПК FlowVision разработан подход на основе уравнения растяжения Рибнера (Ribner’s Dilatation Equation) [5, 6], который позволяет сохранять данные для акустических источников в ближнем поле, и затем проводить отдельный расчет на более крупной сетке, достаточной для разрешения максимальной из выбранных частот. Также имеется возможность моделировать различные конфигурации из нескольких одинаковых источников.

Расчет аэродинамики

В качестве объекта исследования используется двухлопастной пропеллер APC Slow Flyer 10x4.7 радиусом 0.127 м, геометрическая модель которого и аэродинамические характеристики при различных скоростях вращения имеются в открытом доступе [7]. Целью аэродинамического расчета было верифицировать коэффициенты тяги и мощности на известных данных и сохранить источник для последующего акустического расчета. Методика измерений и результаты для статического случая представлены в работе [1].

В Таблице 1 представлено сравнение результатов расчета коэффициентов тяги и мощности с экспериментальными значениями при различных значениях относительной поступи винта, приведенными в работе [7], для частоты вращения винта f = 100 Гц. Погрешности для значений поступи от 0 до 0.29 не превышают 5%, что является приемлемым результатом для инженерных вычислений. При этом использовалась сетка с умеренным числом ячеек порядка 2 млн., что вполне реализуемо на обычном персональном компьютере за время порядка суток.

Таблица. Результаты расчета коэффициентов тяги и мощности

J	Эксперимент		Расчет		Погрешность, %	
	C_T	C_P	C_T	C_P	C_T	C_P
0	0.1259	0.0493	0.1212	0.0477	3.7	3.2
0.1	0.1171	0.0511	0.1134	0.051	3.2	0.2
0.29	0.0847	0.0452	0.0886	0.04813	4.6	3.1

Здесь использованы следующие обозначения: коэффициент тяги $C_T = T / (\rho_\infty f^2 D^4)$, коэффициент мощности $C_P = 2\pi M / (\rho_\infty f^2 D^5)$, относительная поступь винта $J = V_\infty / (f D)$, T – тяга винта, ρ_∞ - плотность в потоке, D = 0.254 м, M – момент силы тяги, V_∞ - скорость потока.

Расчет акустики

В ходе аэродинамического расчета, начиная с достижения квазипериодического режима, производилась запись статического давления в параллелепипеде, охватывающим вращающуюся подобласть. Далее, следуя подходу Рибнера, вычислялся источник для акустического уравнения, и производилось моделирование на акустической сетке. Диаграмма направленности для случая J = 0.1 на расстоянии 2 м от оси винта представлена на рис. 1

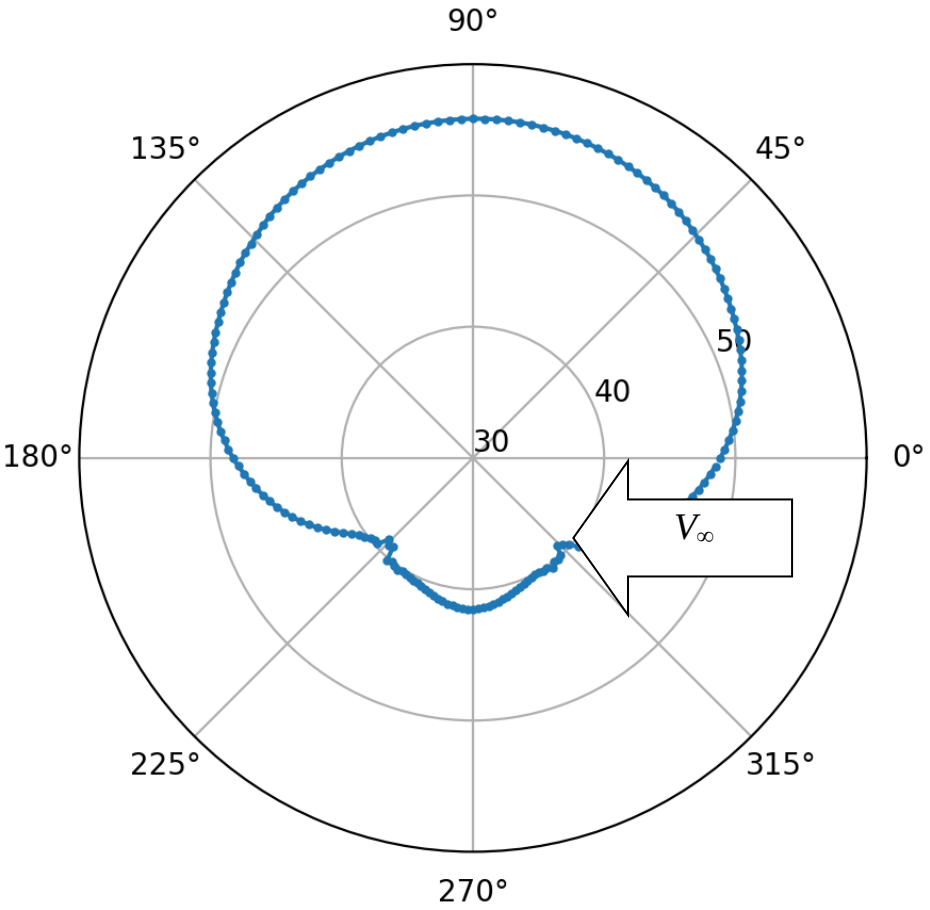


Рис. 1 Диаграмма направленности первой гармоники частоты следования винта для случая J = 0.1.

Разработанную методику в дальнейшем планируется применить для сравнения с экспериментальными данными из работ [8, 9].

Список литературы

1. *Февральских А.В.* Компьютерное моделирование аэродинамики пропеллера в российском пакете программ Flowvision. // РУССКИЙ ИНЖЕНЕР. 2024. 85. №4. С. 33.
2. *Wei W., Ma Y., Wei S., Wang D., Guo M., Yan Q.* Analysis and evaluation of aerodynamic noise characteristics of toroidal propeller. // Drones. 2024. 8. №12. P. 753.

3. *Копьев В.Ф., Остриков Н.Н., Фараносов Г.А., Титарев В.А., Денисов С.Л., Акиньшин Р.В.* О механизме боковой асимметрии излучения шума воздушного винта, установленного вблизи крыла. // Акуст. журн. 2024. 70. №5. С. 692.
4. *Абалакин И. В., Бахвалов П. А., Бобков В. Г., Козубская Т. К., Аникин В. А.* Численное моделирование аэродинамических и акустических характеристик винта в кольце // Матем. Моделирование. 2015. 27. № 10. С. 125.
5. *Ribner H.S.* Aerodynamic sound from fluid dilatations: A theory of the sound from jets and other flows. // UTIA Report. 1962. № 86. AFOSR TN 3430
6. *Maurerlehner, P., Schoder, S., Tieber, J., Freidhager, C., Steiner, H., Brenn, G., Schäfer, K.H., Ennemoser, A. and Kaltenbacher, M.* Aeroacoustic formulations for confined flows based on incompressible flow data. // Acta Acustica. 2022. № 6. P. 45.
7. *Brandt J.B., Selig M.S.* Small-Scale Propeller Performance at Low Speeds – Online Database. https://m-selig.ae.illinois.edu/props/volume-1/propDB-volume-1.html. 2010.
8. Самохин В.Ф., Мошков П.А. Экспериментальное исследование акустических характеристик силовой установки самолета" Ан-2" в статических условиях // Труды МАИ. 2015. 82. С. 17.
9. *Беляев И.В., Валиев А.В., Мошков П.А., Остриков Н.Н.* Исследование акустических характеристик беспилотного летательного аппарата «Птеро-G0» в заглушенной камере АК-2 // Вестник Московского авиационного института. 2017. 24. № 4. С. 52.

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39555

Сравнительный анализ упрощенного однолопастного подхода и расчета полной конфигурации в задаче моделирования тонального шума несущего винта с различным числом лопастей

Воронцов В.И., Зайцев М.Ю., Фараносов Г.А.
ФАУ «ЦАГИ» НИЦ аэроакустики, ул. Радио 17, Москва, 105005 Россия

Основным источником шума вертолёта на местности является его несущий винт. Моделирование акустических характеристик несущего вертолётного винта представляет собой крайне актуальную и востребованную задачу. Классическим подходом для численного решения данной задачи является моделирование обтекания несущего винта с построением численной сетки, описывающей многолопастную конфигурацию с незначительными упрощениями геометрии. Данный подход позволяет смоделировать вихревую систему винта, её развитие и взаимодействие с лопастями, находящимися в заведомо разных условиях обтекания. Но, несмотря на явные преимущества, данный подход предъявляет существенные требования к вычислительным возможностям используемых компьютеров. В качестве альтернативы может быть использован упрощённый подход, подразумевающий моделирование обтекания одной лопасти с последующей коррекцией результатов. Сокращение расчётной области и вместе с этим размеров вычислительных сеток позволяет перенести расчёты с серверов и дорогостоящих рабочих станций на ординарные рабочие компьютеры, сохраняя при этом возможность получения тонального шума винта инженерной точности.

Данная работа посвящена сравнительному анализу данных численных расчётов тонального шума несущего винта вертолёта в двух- и четырехлопастной конфигурациях, полученных двумя подходами.

Ключевые слова: вычислительная аэроакустика, несущий винт, тональный шум

COMPARATIVE STUDY OF THE SINGLE-BLADE VS. FULL-CONFIGURATION APPROACH FOR MODELING TONAL NOISE OF A MAIN ROTOR WITH VARIABLE BLADE COUNT

Vorontsov V.I., Zaytsev M.Y., Faranosov G.A.

Central Aerohydrodynamic Institute (TsAGI) Research center of aeroacoustics. Moscow 105005, Russia.

E-mail: aeroacoustics@tsagi.ru

The primary source of helicopter community noise is the main rotor. Modeling the acoustic characteristics of the main rotor is an extremely relevant and in-demand task. The classical approach for the numerical solution of this problem is to simulate the flow around the main rotor using a numerical grid describing a multi-blade configuration with minor geometric simplifications. This approach makes it possible to simulate the rotor vortex system, its evolution, and interaction with blades located in different flow conditions. However, despite the obvious advantages, this approach places significant demands on computing capabilities. Alternatively, a simplified approach can be used, which involves modeling the flow around a single blade with subsequent correction of the results. Reducing the computational domain and, at the same time, computational grid allows calculations to be transferred from servers and expensive workstations to ordinary work computers, while maintaining the ability to predict tonal noise with acceptable engineering accuracy. This paper presents a comparative analysis of data from numerical simulations of the tonal noise of the main rotor in two- and four-bladed configurations obtained by two approaches.

Keywords: computational aeroacoustics, main rotor, tonal noise

PACS: 47.32.C, 47.35.Rs, 51.40.+p.

УДК: 534.836.2+534.2 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39556

Расчетное исследование влияния клокинга на тональный шум первых двух подпорных ступеней КНД для различных режимов работы

А.А. Россихин[1,a], В.И. Милешин[1,b]

[1] *ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова», 111116, Россия, Москва, ул. Авиамоторная, 2.*

E-mail: [a]aarossikhin@ciam.ru, [b]vimileshin@ciam.ru

Аннотация: Представлены результаты исследования влияния клокинга рабочих колес на тональный шум первых двух подпорных ступеней КНД ТРДД для режима работы с относительной частотой вращения вала 55%. Рассматриваемая расчетная модель включает в себя рабочее колесо вентилятора и две подпорные ступени с входным направляющим аппаратом. Ступени имеют одинаковые числа лопаток в рабочих колесах и направляющих аппаратах. С использованием метода расчета в частотной области были произведены расчеты для пяти взаимных положений рабочих колес. Результаты расчетов сопоставлены с результатами ранее выполненных расчетов для режима с относительной частотой вращения вала 58%. Показано, что снижение частоты вращения вала приводит к изменению зависимости мощности шума от взаимного положения рабочих колес. В то же время, сохраняется возможность подобрать такое взаимное положение рабочих колес, которое способствовало бы низким уровням шума и на том и на другом режиме.

Ключевые слова: вычислительная аэроакустика, клокинг, шум подпорных ступеней, шум многоступенчатых лопаточных машин.

Numerical investigation of the influence of clocking on tone noise of LPC first two booster stages for different operating modes

A.A. Rossikhin[1,a], V.I. Mileshin[1,b]

[1] Central Institute of Aviation Motors. 2, Aviamotornaya st., Moscow 111116, Russia.

E-mail: [a]aarossikhin@ciam.ru, [b]vimileshin@ciam.ru

Abstract: Results of numerical investigation of the influence of clocking on tone noise of turbofan engine low pressure compressor first two booster stages for operating mode with relative shaft rotation frequency 55% are presented. The model under consideration includes a row of rotor blades of the fan, rows of rotor blades and rows of stator blades corresponding to

the first two booster stages and also row of inlet guide vanes of the booster. The stages have identical numbers of rotor blades and of stator blades. With the use of a method of calculation in frequency domain, computations have been performed for five mutual positions of rotor blade rows. The results of calculations were compared with the results of previous calculations for operating mode with relative shaft rotation frequency 58%. It was shown, that decrease in frequency of rotation of a shaft leads to change of dependence of noise power from mutual position of rotor blade rows. At the same time, possibility to find such mutual position of rotor blade rows, which would provide low noise levels for both operating modes remains.

Keywords: computational aeroacoustics, clocking, noise of booster stages, noise of multistage turbomachines

PACS: 43.50.Lj

Введение

Одним из компонентов тонального шума турбореактивных двухконтурных двигателей (ТРДД) с высокой степенью двухконтурности является шум взаимодействия между венцами в подпорных ступенях компрессора низкого давления (КНД). Хотя подпорные ступени как источник шума менее значимы, чем вентилятор, их шум может быть заметен на некоторых режимах работы двигателя [1]. Особенностью подпорных ступеней как источника шума является то, что их шум определяется взаимодействием нескольких венцов. В случае если подпорные ступени содержат венцы с одинаковым числом лопаток и эти венцы принадлежат одной группе венцов (роторной или статорной), то взаимное смещение этих венцов в окружном направлении (клокинг) может менять как аэродинамические, так и акустические характеристики подпорных ступеней. Использование клокинга потенциально может помочь снизить шум подпорных ступеней. В предыдущей работе авторов было проведено исследование влияния клокинга на тональный шум первых двух подпорных ступеней КНД ТРДД с высокой степенью двухконтурности на режиме «посадка» (относительная частота вращения вала 58%). Ступени имели одинаковые числа лопаток в рабочих колесах и направляющих аппаратах. Было показано, что мощность излучения из воздухозаборника при клокинге рабочих колес может меняться на 4 дБ [2].

При разработке мероприятий по снижению шума подпорных ступеней желательно было бы убедиться, что изменение режимных параметров в разумных пределах не приводит к существенному снижению эффективности мероприятий. Изменение требований к параметрам режима работы может произойти как в процессе разработки двигателя, так и по

эксплуатационным соображениям. Поэтому было произведено исследование эффекта клокинга для режима с относительной частотой вращения вала 55% (снижение частоты вращения вала на 5% относительно частоты вращения для ранее рассмотренного режима). Главная цель исследования состояла в том, чтобы выяснить, как меняется зависимость мощности излучения от относительного положения рабочих колес с изменением режима работы.

1 Объект исследования

Рассматриваемый КНД в стендовой конфигурации представляет собой модель диаметром D=700 мм [1,2]. Он включает в себя вентилятор с широкохордными лопатками рабочего колеса, а также подпорные ступени. Вентилятор имеет в рабочем колесе (РК) 18 лопаток, а в спрямляющем аппарате (СА) – 42 лопатки. Во входном направляющем аппарате (ВНА) подпорных ступеней – 79 лопаток. За ВНА расположены четыре подпорные ступени. Числа лопаток в рабочих колесах двух первых подпорных ступеней ($РК_{I}$ и $РК_{II}$) - 69, в направляющих аппаратах ($НА_{I}$ и $НА_{II}$) - 74. Такая конфигурация позволяет исследовать как клокинг рабочих колес, так и клокинг направляющих аппаратов. Схема КНД в стендовой компоновке показана на рис. 1, а, а ее увеличенный фрагмент, позволяющий рассмотреть подпорные ступени, представлен на рис. 1, б.

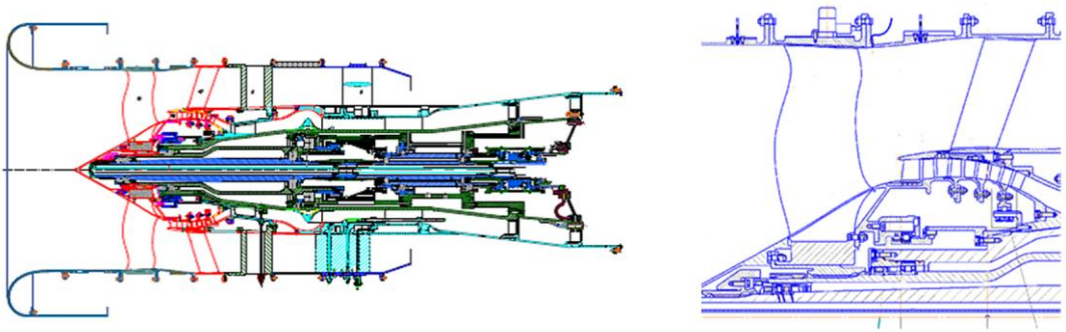


Рисунок 1. Схема модельного КНД: а) общий вид; б) увеличенный фрагмент.

Для данного КНД были выполнены экспериментальные исследования аэродинамических и акустических характеристик на стенде ЦИАМ. К сожалению, взаимное положение венцов для первой и второй подпорных ступеней в эксперименте не известно. Базовое положение венцов, принятое в рамках данной работы, соответствует тому, которое использовалось при создании конструкторской документации на КНД.

2 Численный метод

Метод [3,4] расчета нестационарных полей течения, используемый в рамках данной работы, основан на решении трехмерной системы уравнений Эйлера для возмущений в системе отсчета, связанной с лопаточными венцами. На первом этапе вычислений, с использованием полных осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса и интерфейсов между венцами

типа “mixing plain”, проводится расчет среднего стационарного поля течения внутри турбомашины. На втором этапе вычислений производится нестационарный расчет распространения возмущений. При его проведении для пространственной дискретизации используется метод конечных объемов. Для аппроксимации потоков используется DRP (Dispersion Relation Preserving) схема четвертого порядка. Для выполнения шага по времени в данной работе использовались схемы Рунге-Кутта типа HALE-RK (High-accuracy large-step explicit Runge–Kutta) четвертого порядка. Дополнительные подробности можно найти в [3,4].

В рамках используемого метода расчета тонального шума многоступенчатых турбомашин в частотной области решение в лопаточном венце ищется в виде набора полей гармонических фрагментов в одном межлопаточном канале венца. Под гармоническим фрагментом подразумевается совокупности возмущений в венце имеющих одинаковую частоту и фазовый сдвиг между границами межлопаточного канала. Предполагается, что нестационарное поле течения в венце можно приближенно описать, используя относительно небольшое число гармонических фрагментов [4].

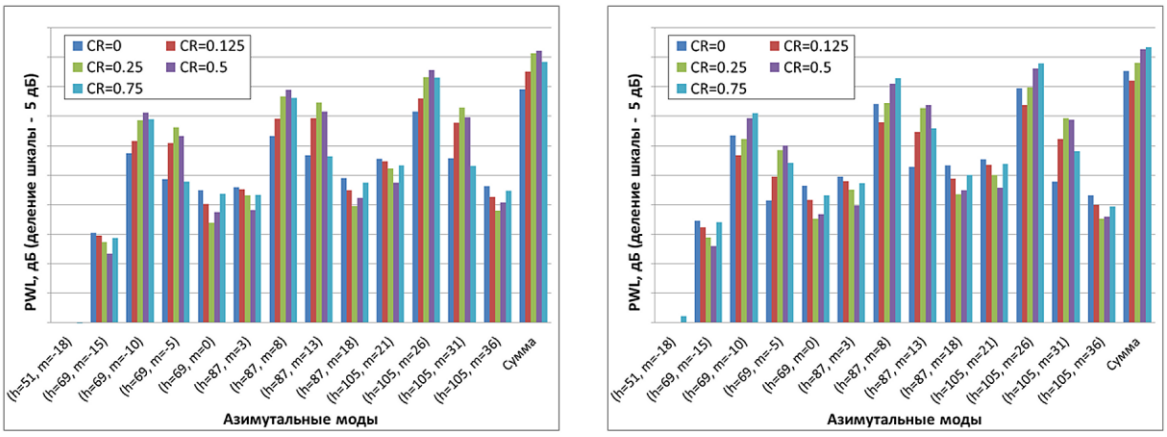
3 Расчет нестационарного поля течения для различных взаимных положений венцов

В рамках работы исследовался клокинг рабочих колес. Для удобства введем параметр клокинга для рабочих колес CR равный углу сдвига $РК_{II}$ относительно $РК_{I}$ в окружном направлении, отнесенному к окружному размеру межлопаточного канала для сдвигаемого венца ($2\pi/69$). В рамках исследования, как и в [2], были проведены расчеты для конфигураций с CR=0, 0.25, 0.5 и 0.75. Дополнительно для обоих режимов были проведены расчеты с CR=0.125, чтобы уточнить положение, при котором мощность излучения минимальна.

Постановка всех шести расчетов была одинаковой. Была поставлена задача разрешить тона с частотами f_2 (69N), f_2-f_1 (51N), f_2+f_1 (87N) и f_2+2f_1 (105N), где N – частота вращения вала КНД. Здесь f_1 = 18N - это частота следования РК вентилятора, а f_2 = 69N - это частота следования $РК_{I}$. Данные тона были выбраны на основании результатов предыдущих исследований. В соответствии с эвристическими соображениями, изложенными в [4], были определены наборы гармонических фрагментов, которые должны быть разрешены в венцах, чтобы найти тональный шум для заданных частот. Расчеты проводились для 7 гармонических фрагментов в РК, для 17 в ВНА подпорных ступеней, для 27 в $РК_{I}$ и $РК_{II}$ и для 25 в $НА_{I}$ и $НА_{II}$ (всего для 128 гармонических фрагментов).

После завершения постановочной части расчетов был произведены численные расчеты полей гармонических фрагментов. Всего требовалось 20000 шагов до достижения сходимости для каждого из расчетов.

Когда решения установилось, был проведен модальный анализ пульсаций на входе в КНД. Результаты модального анализа в виде уровней мощности азимутальных мод, соответствующих распространяющимся по проточному тракту акустическим возмущениям, представлены на рис. 3, а. На рис. 3, б представлены аналогичные результаты для режима 58%, полученные в работе [2] (а также вновь полученные данные для CR=0.125).



(а) (б)

Рисунок 2. Результаты модального анализа на поверхности перед вентилятором для различных значений CR: а) режим 55%; б) режим 58%.

На основании рис. 3 можно заключить, что для режима 55%, так же, как и для режима 58%, наблюдается сильное изменение мощности излучения подпорных ступеней при клокинге рабочих колес. Для режима 55% максимальная мощность излучения наблюдается при значении CR=0.5, а минимальная соответствует базовому положению венцов. Разность мощности между этими положениями составляет 6.5 дБ. Для режима 58% наибольшая мощность излучения наблюдается для CR=0.75. Она на 5.4 дБ больше, чем для конфигурации с CR=0.125, для которой наблюдается минимум мощности излучения (и на 4 дБ больше, чем для CR=0, как было показано в [2]).

Таким образом, по результатам исследований можно заключить, что при изменении режима наблюдается изменение относительных положений венцов, при которых наблюдается как максимум, так и минимум излучения. Обращает на себя внимание, что положение, соответствующее максимуму, смещается по CR сильнее, чем положение, соответствующее минимуму. Также видно, что принятого в работе [2] шага изменения CR – 0.25 недостаточно для точного определения положения минимума излучения.

Относительные положения рабочих колес, при которых наблюдается минимальная мощность излучения, для обоих режимов близки. Поэтому несложно выбрать такое взаимное положение рабочих колес, которое способствовало бы низким уровням шума (относительно максимально возможных значений) и на режиме с относительной частотой вращения вала 55% и на режиме с относительной частотой вращения вала 58%. Например, для положения с

CR=0.125 мощность шума меньше максимального значения на 3.5 дБ для первого режима и на 5.4 дБ для второго. Другими вариантами являются положение с CR=0 или какое-то положение со значением CR между 0 и 0.125. В целом, выбор взаимного положения должен опираться на анализ того, какие режимы из тех, для которых актуален вопрос снижения шума подпорных ступеней, могут быть задействованы в процессе эксплуатации. Желательно, обеспечить максимальное снижение мощности излучения для наиболее часто задействованного режима. В то же время, если несколько режимов имеет сравнимую значимость, возможно, потребуется некоторый компромисс в выборе взаимного положения венцов.

Заключение

Представлены результаты исследования влияния клокинга на тональный шум первых двух подпорных ступеней КНД ТРДД с высокой степенью двухконтурности для режима работы с относительной частотой вращения вала 55%. Результаты исследования сопоставлены с результатами исследования клокинга для относительной частоты вращения вала 58%.

В рамках работы были произведены расчеты для пяти взаимных положений рабочих колес. Показано, что мощность излучения из воздухозаборника при клокинге (для режима 55%) может меняться на 6.5 дБ. Сравнение с данными для режима с относительной частоты вращения вала 58% показало, что изменение частоты вращения вала приводит к изменению кривой зависимости мощности шума от взаимного положения рабочих колес. В то же время, сохраняется возможность подобрать такое взаимное положение рабочих колес, которое способствовало бы низким уровням шума и на том и на другом режиме.

Список литературы

[1] *Khaletskiy Y., Mileshin V.* Experimental Study Of 700-mm Fan Model Noise At CIAM Anechoic Chamber. // GT2013-94454, ASME Turbo Expo 2013, San Antonio, Texas, USA, June 3-7, 2013.

[2] *Россихин А.А., В.И. Милешин* Расчетное исследование влияния клокинга (clocking) на тональный шум первых двух подпорных ступеней турбореактивного двухконтурного двигателя. // Акустический журнал. 2025. **71**, № 4. С. 582.

[3] *Nyukhtikov M.A., Rossikhin A.A., Sgadlev V.V., Brailko I.A.* Numerical Method for Turbo-Machinery Tonal Noise Generation and Radiation Simulation Using CAA Approach. // GT2008-51182, ASME Turbo Expo 2008, Berlin, Germany, June 9-13, 2008.

[4] *Rossikhin A.A., Pankov S.V., Mileshin V.I.* Numerical Investigation of The First Booster Stage Tone Noise of a High Bypass Ratio Turbofan. // GT2016-57352, ASME Turbo Expo 2016, Seoul, South Korea, June 13-17, 2016.

УДК: 621.67:532.517.6.001 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39557

Анализ генерации звука в воздуховоде осевым вентилятором с применением методов Кроу-Артамонова и Рибнера

А.А. Аксенов[1,a], С.Ф. Тимушев И.О.[2,b], П.А. Мошков А.Ф[2,b], Д.В. Клименко [2,b]

[1] ООО «Тесис». *Москва, ул. Юннатов, 18.*

[2] Московский авиационный институт. *Москва, Волоколамское шоссе, 4.*

E-mail: [a]andrey@tesis.com.ru, [b]irico.harmony@gmail.com

Аннотация: Генерация шума лопаточными машинами, и в их числе, осевыми вентиляторами является актуальной проблемой при проектировании систем охлаждения и вентиляции в различных отраслях. В данной работе основной целью является тестирование методов численного моделирования процесса генерации шума и псевдозвуковых пульсаций давления в осевом вентиляторе. Численное моделирование нестационарного турбулентного потока, пульсаций давления и звуковых волн, излучаемых на частоте следования лопаток, проведено для осевого вентилятора двумя различными методами акустико-вихревой декомпозиции: методом Кроу-Артамонова и методом Рибнера. Данные методы отличаются математической формулировкой источника колебаний в неоднородном волновом уравнении. Расчеты и экспериментальные измерения проведены для вентилятора диаметром 0,12 м с пятью рабочими лопатками, установленного в цилиндрической трубе длиной 0.94 м. В ходе математического моделирования решается задача определения параметров нестационарного турбулентного течения, на основе которого определяется источниковая функция в волновом уравнении.

Ключевые слова: пульсации давления, звук, осевой вентилятор, акустико-вихревая декомпозиция, ближнее поле, частота следования лопаток

Analysis of sound generation in an air duct by an axial fan using the Crow-Artamonov and Ribner methods

A.A. Aksenov[1,a], S.F. Timushev[2,b], P.A. Moshkov[2,b], D.V. Klimenko[2,b]

[1] *Tesis LLC. 18, Yunnatov St. Moscow, Russia.*

[2] *Moscow Aviation Institute. 4, Volokolamskoye highway, Moscow, Russia.*

E-mail: [a]andrey@tesis.com.ru, [b]irico.harmony@gmail.com

Abstract: Noise generation by blade machines, such as axial fans, is a significant issue in the design of cooling and ventilation systems in various industries. This paper aims to test numerical simulation methods for predicting noise and pressure pulsations generated by an

axial fan. Numerical simulations of an unsteady turbulent flow, pressure fluctuations, and sound waves emitted at the frequency of blade passing were performed for an axial fan using two different acoustic-vortex decomposition methods: the Crow-Artamonov method and the Ribner method. These methods differ in their mathematical formulation of the oscillation source in the inhomogeneous wave equation. Computations and experimental measurements were conducted for a fan with a diameter of 0.12 meters with five working blades installed in a cylindrical tube of length 0.94 meters. In the process of mathematical modeling, the problem of determining the parameters of an unsteady turbulent flow is solved. Based on this, the source function in the wave equation can be determined.

Keywords: pressure pulsations, sound, axial fan, acoustic-vortex decomposition, near field, blade passing frequency

PACS: 43.28.−g:

Введение

Снижение уровня шума и нестационарных нагрузок, действующих на конструкцию лопаточных машин, работающих в открытом пространстве, жилых, и производственных помещениях, культурных заведениях, салонах автомобилей, поездов, кабинах самолетов и космических аппаратов, становится все более актуальной задачей. В решении данной проблемы важное место занимают методы численного моделирование и оптимизации акустических характеристик широкого класса лопаточных машин с дозвуковым течением рабочей среды. К лопаточным машинам с дозвуковым течением относятся вентиляторы, и другая техника.

Физические механизмы генерации аэродинамического шума осевых вентиляторов, в частности, подробно рассмотрены в книге А. Геделя [1] , где отмечено, что спектр шума вентиляторов состоит из широкополосного шума и тональных компонент на частотах, кратных частоте следования рабочих лопаток ротора (ЧСЛ). Различные аналитические и полуэмпирические методы для расчета широкополосного шума вентилятора учитывают такие физические явления, как турбулентность на входе ротора, турбулентный пограничный слой на лопатках, влияние выходной кромки лопатки, течение в радиальном зазоре на периферии ротора, отрыв потока на лопатках.

Тональные компоненты на частотах, кратных частоте следования лопаток (ЧСЛ) обычно доминируют в спектре и определяют общий уровень звуковой мощности всех рассматриваемых типов лопаточных машин.

В связи с развитием возможностей применения методов вычислительной гидродинамики и акустики, все более широкое развитие получают подходы, основанные на

численном моделировании нестационарного потока в лопаточных машинах современными методами вычислительной гидродинамики, например LES с последующим определением акустического излучения. В сочетании с аэроакустической аналогией развиваются и другие методы, как, например, RANS+ LEE+SNGR [2], а также DDES [3] совместно с уравнением Лайтхила или Рибнера. Активно развиваются и применяются методы, подобные уравнению Ффовкс Уильямса – Хокинга (FW-H) и решатели акустики прямого численного моделирования (CAA), которые используют данные CFD для вычисления распространения шума в дальнее поле [4]. Одновременно продолжают развиваться методы численного моделирования. Стандартом стало использование методов моделирования крупных вихрей (LES) или гибридных подходов (DES, IDDES) для расчетов нестационарного потока и генерации шума в следе за лопатками [5]. Перспективным является подход, который впервые предложен Пауэллом [6], а далее развит в работах Кроу [7], Артамонова [8], Хоу [9]. Промежуточное положение занимает подход Рибнера [10], в котором введено прямое разделение стационарной и пульсационной составляющей для акустической и вихревой моды.

1 Основные уравнения

На основании теоремы Коши-Гельмгольца вводится акустическая и вихревая моды движения рабочей жидкости: скорость движения сжимаемой среды представляется в виде векторной суммы основного поступательного и вращательного движения жидкости как несжимаемой среды (вихревой моды) и малых колебаний, обусловленных сжимаемостью (акустической моды). Приняты следующие допущения: поток дозвуковой; течение изоэнтропийное; -затухание, обусловленное вязкостью, не учитывается; акустические колебания существенно меньше псевдозвуковых пульсаций давления.

Нестационарную скорость жидкости можно определить в виде суммы скорости вихревой моды (поступательного и вращательного движения абсолютно несжимаемой среды) и скорости акустического движения, которую можно ввести через акустический потенциал. Тогда для скорости сжимаемой среды получаем следующее выражение (1) :

$$\mathbf{V} = \mathbf{U} + \nabla\varphi \tag{1}$$

Теперь, разделяя в уравнении Эйлера для сжимаемой среды скорость на акустическую и вихревую моды и линеаризуя, получим волновое уравнение (2) относительно акустического потенциала:

$$\frac{1}{c_0^{\,2}}\frac{d^2\varphi}{dt^2} - \Delta\varphi = \frac{1}{c_0^{\,2}}\frac{dH}{dt} \tag{2}$$

В уравнении (2) нестационарное вихревое движение жидкости (псевдозвук H) генерирует акустические колебания энтальпии i , как показано в (3).

$$-\frac{\partial \varphi}{\partial t} = i - H \tag{3}$$

Пренебрегая конвективными членами и линеаризуя, получаем уравнение (4) Кроу-Артамонова:

$$\frac{1}{{c_0}^2}\frac{\partial^2 i}{\partial t^2} - \Delta i = -\Delta H \tag{4}$$

Дифференцируя уравнение (2) по времени и пренебрегая конвективными членами, получаем уравнение Рибнера (5) относительно пульсаций акустического давления P_a

$$\frac{1}{{c_0}^2}\frac{\partial^2 P_a}{\partial t^2} - \Delta P_a = -\frac{1}{{c_0}^2}\frac{d^2 H}{dt^2} \tag{5}$$

2 Тестирование

Тестирование проведено на данных по измерению пульсаций давления осевого вентилятора ВН-2, установленного в середине трубы диаметром 150 мм и длиной 940 мм. Вентилятор имеет 5 рабочих лопаток. Внешний радиус лопаток ротора -- 60 мм (Рис. 1). Корпус вентилятора диаметром 128 мм установлен в трубе на фиксирующихся опорах. Пульсации давления измерены вверх и вниз по течению вентилятора, В данном тесте представлены данные, соответствующие положению вентилятора в середине трубы и скорости вращения 2670 об/мин.

На рис. 3 приведено поле нестационарного давления вверх по течению от ротора, полученное в однопроцессорной программе для расчета методом Кроу-Артамонова. Распределение нестационарного давления вверх по течению от ротора, вблизи входных кромок лопаток, выявляет круговую симметрию с порядком равным числу лопаток. Это распределение вращается вместе с ротором, производя псевдо-звуковые пульсации давления вблизи входных кромок лопаток.

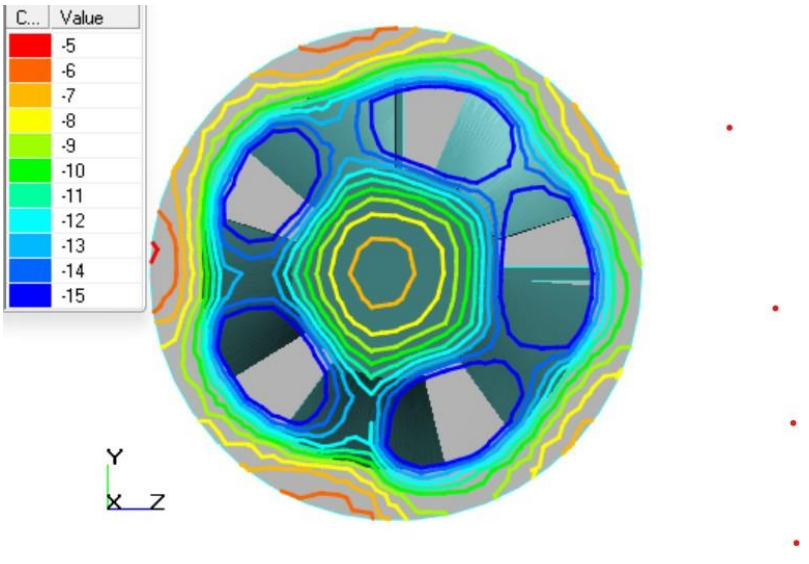


Рис. 1 Нестационарное поле давления на входе перед лопатками ротора. Расчет в FV 2.5

Аналогичное поле, полученное в мультипроцессорной версии для расчета звукового поля методом Рибнера представлено на рис. 4.

Эти результаты показывают, что вихревая мода нестационарного течения, представленная в двух расчетах, качественно хорошо согласуются.

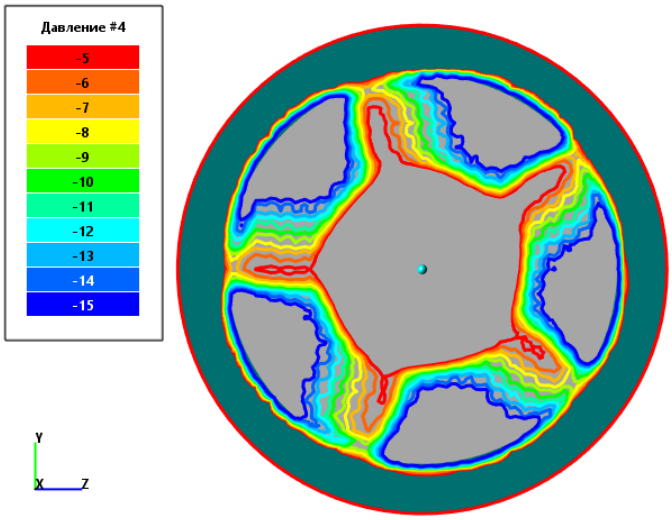


Рис. 2 Нестационарное поле давления на входе перед лопатками ротора. Расчет в FV 3.15

Сопоставление амплитуды первой гармоники ЧСЛ проведено в сечении на расстоянии 150 мм от входных кромок лопаток ротора вентилятора, в точке с радиусом 60 мм. Результаты представлены в Табл. 1 ниже.

Таблица 1

Тестирование по амплитуде первой гармоники ЧСЛ

	Расчет по методу Кроу-Артамонова	Расчет по методу Рибнера	Измеренные величины	Погрешность измерения
Амплитуда ЧСЛ, Па	0.624	0.049	0.754	+/- 0.132

Заключение

Предварительное тестирование аэроакустической модели осевого вентилятора в трубе, построенной на основе уравнения Рибнера выполнено для амплитуды первой гармоники ЧСЛ. В средней части трубы, на расстоянии 150 мм от входных кромок лопаток, расчет по методу Рибнера дает более, чем в десять раз заниженное значение по сравнению с измерениями и расчетом по методу Кроу-Артамонова. Очевидно, такой результат обусловлен влиянием псевдозвуковых колебаний в ближнем поле. Необходим дальнейший анализ этих результатов, включая влияние импеданса открытого конца трубы, прохождение волн через ротор вентилятора, учет амплитуды псевдозвука.

Список литературы

1. *A. Guédel Acoustique des ventilateurs. CETIAT. PYC LIVRES, 1999*
2. *Zhu Y.J., Ou Y.H., Tian J. Experimental and Numerical Investigation on Noise of Rotor Blade Passing Outlet Grille. NCEJ 2008*
3. *De Reboul Silouane, Zerbib Nicolas, Heather Andrew Use OpenFOAM coupled with Finite and Boundary Element Formulations for Computational Aero-Acoustics for Ducted Obstacles. Inter Noise 2019*
4. *Zhang, L., & Wang, H. (2022). Prediction of tonal noise from a subsonic axial fan with a coupled IDDES-FW-H approach. Applied Acoustics, 195, 108827.*
5. *Sun, Y., & Liu, C. (2023). Large Eddy Simulation of tip clearance flow and its broadband noise in an axial fan. Journal of Sound and Vibration, 544, 117435.*
6. *A. Powell, Theory of vortex sound. Journal of the Acoustical Society of America 36(1), 177-195.*
7. *S.C. Crow Aerodynamic Sound Emission as a Singular Perturbation Problem.- Studies in Applied Mathematics, 1970, vol. XLIX, No.1.*
8. *К.И. Артамонов Термогидро-акустическая устойчивость. М.:Машиностроение, 1982. – 261С.*
9. *Howe M. S. Contribution to the theory of aerodynamic sound, with application to excess jet noise and the theory of the flute. J. Fluid Mech.– 1975.– 71, № 4.– P. 625–673.*
10. *H.S. Ribner, The Generation of Sound by Turbulent Jets, Advances in Applied Mechanics, 1964, Volume 8, pages 103-182. A. Guédel Acoustique des ventilateurs. CETIAT. PYC LIVRES, 1999*

УДК: 534.32. DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39558

Комплексная оценка эффективности акустических материалов по результатам испытаний образцов в импедансной трубе

М.Н. Остроумов[1,a], П.А. Мошков[2,b]

[1, 2] *Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 125993, Москва, Волоколамское шоссе, 4*

E-mail: [a]*ostroumovmn@mai.ru*, [b]*moshkov89@bk.ru*

Аннотация: Проведены измерения в импедансной трубе пористых звукопоглощающих материалов (ЗПМ) и теплозвукоизолирующих материалов (ТЗИМ), а также пакетов материалов ЗПМ+ТЗИМ в диапазоне частот 500-6300 Гц. Оценено влияние слоя ЗПМ на звукоизолирующие свойства пакета материалов, а также влияние ТЗИМ на звукопоглощающие свойства пакета материалов. Показано, что звукоизоляционные свойства пакета определяются преимущественно слоем ТЗИМ, тогда как звукопоглощение может быть оптимизировано за счет выбора соотношения толщин слоев.

Ключевые слова: шум в салоне, коэффициент звукопоглощения, потери при передаче звука, импедансная труба

Comprehensive assessment of the effectiveness of acoustic materials based on the results of testing samples using impedance tube

M.N. Ostroumov [1,a], P.A. Moshkov[2,b]

[1, 2] *Moscow Aviation Institute (National Research University), 4 Volokolamskoe Sh., Moscow, 125993, Russia.*

E-mail: [a]*ostroumovmn@mai.ru*, [b]*moshkov89@bk.ru*

Abstract: Measurements were carried out in an impedance tube for porous sound-absorbing materials (SAM) and heat-and-sound-insulating materials (HSIM), as well as for SAM+HSIM material packages, in the frequency range of 500–6300 Hz. The influence of the SAM layer on the sound-insulating properties of the material package was assessed, as well as the influence of the HSIM layer on the sound-absorbing properties of the material package. It was shown that the sound insulation properties of the package are primarily determined by the HSIM layer, while sound absorption can be optimized by selecting the layer thickness ratio.

Keywords: cabin noise, sound absorption coefficient, sound transmission loss, impedance tube

PACS: 43.28.-g

Введение

Проблема рационального выбора акустических материалов занимает отдельное место в проблеме шума в салоне современного гражданского самолета [1–3]. Под рациональным выбором следует понимать схему расположения акустических материалов в бортовой конструкции, обеспечивающую требуемые уровни шума в салоне с учетом реального акустического и аэроакустического нагружения конструкции в условиях массовых и габаритных ограничений [4–7]. Акустические материалы должны обеспечивать как хорошие звукоизоляционные свойства фюзеляжа, так и хорошие звукопоглощающие свойства интерьера.

В работе выполнена комплексная оценка акустической эффективности звукопоглощающих (ЗПМ) и теплозвукоизолирующих материалов (ТЗИМ), а также их комбинаций ЗПМ+ТЗИМ на основе испытаний образцов материалов в импедансной трубе МАИ. Коэффициент звукопоглощения измерен по стандарту ISO 10534-2, потери при передаче звука — по ASTM E2611-24 (в диапазоне частот 500–6300 Гц). Подробное описание методов и лабораторной базы МАИ приведено в работах [8, 9].

1 Исследуемые акустические материалы

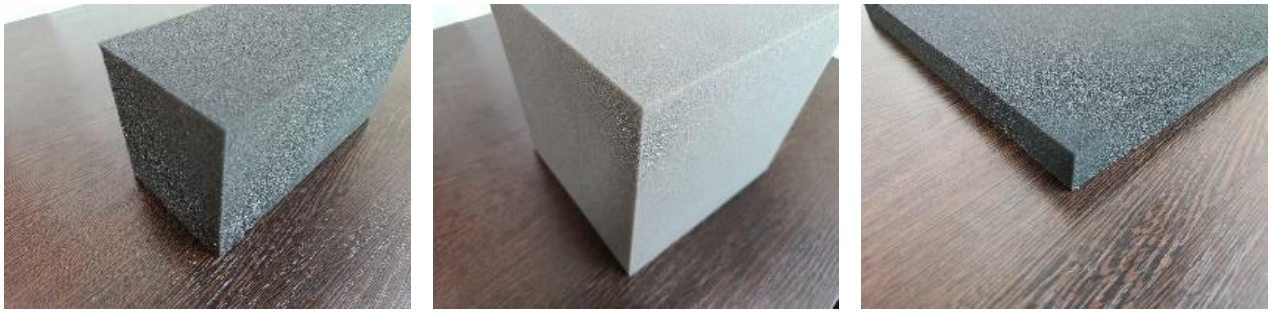
Исследованы четыре типа ЗПМ (акустический поролон, акустическая пена, пенопластовая вставка, пенные губки), один ТЗИМ (akulite SE), а также пакеты на их основе. Общий вид образцов представлен на рис. 1. Плотность материалов составила 18–32 кг/м³ (таблица 1). Для проведения акустических измерений была использована капсула со шкалой (рис. 2).

Испытания проведены для образцов высотой 90 мм, а также для пакетов с различным соотношением толщин слоев (30/60 мм и 60/30 мм) при суммарном уровне «белого» шума около 100 дБ.

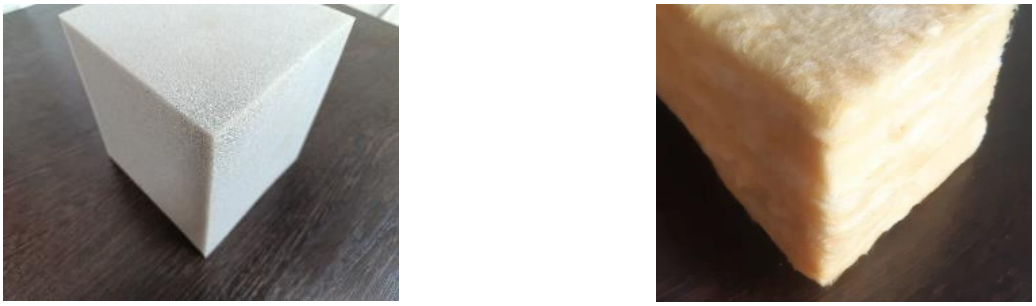
Таблица 1

Исследуемые акустические материалы и их плотности

	ЗПМ				**ТЗИМ**
Тип материала	Акустический поролон	Акустическая пена	Пенопластовая вставка	Пенные губки	Akulite SE
Плотность, кг/м^3	22	19	32	18	30



а) акустический поролон б) акустическая пена в) пенопластовая вставка



г) пенные губки д) akulite SE

Рис. 1. Общий вид исследуемых материалов

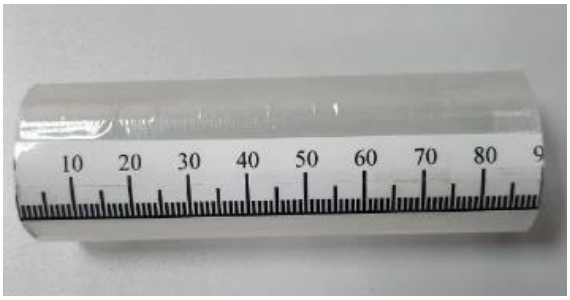


Рис. 2. Капсула для измерений материалов и пакетов ЗПМ+ТЗИМ

2 Результаты определения акустических свойств материалов высотой 90 мм

На рис. 3 представлен коэффициент звукопоглощения для различных материалов высотой 90 мм в третьоктавных полосах частот. Коэффициент звукопоглощения ТЗИМ типа akulite SE равномерно увеличивается с ростом частоты, что является характерным для рыхловолокнистых ТЗИМ. Из исследованных ЗПМ пенопластовые вставки обладают высоким коэффициентом звукопоглощения до 1 в третьоктавных полосах частот 800, 2500 и 4000 Гц. Коэффициент звукопоглощения других ЗПМ в области частот 500-2500 Гц значительно ниже.

На рис. 4 представлены потери при передаче звука для различных материалов высотой 90 мм в третьоктавных полосах частот. Потери при передаче звука равномерно увеличиваются с возрастанием частоты [5, 6]. Несмотря на близкую плотность сравниваемых материалов (табл. 1) рыхловолокнистый ТЗИМ типа akulite SE обладает лучшими звукоизоляционными свойствами из всех рассмотренных акустических материалов.

Поскольку самым эффективным из четырех материалов ЗПМ оказались пенопластовые вставки, то на следующем этапе работы рассмотрим влияние пакета материалов ТЗИМ+ЗПМ на акустические характеристики только для данного материала.

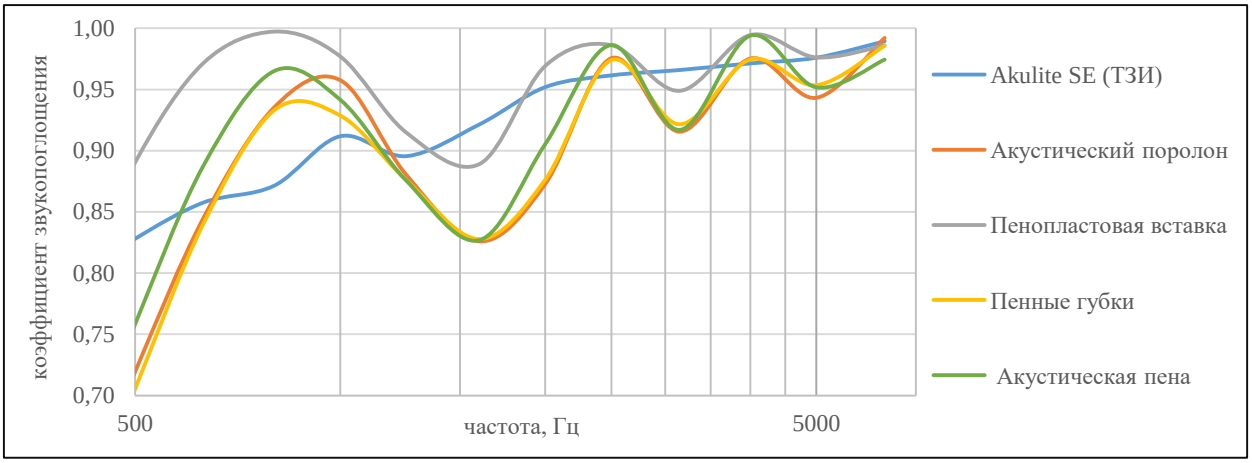


Рис. 3. Коэффициент звукопоглощения для различных материалов высотой 90 мм в третьоктавных полосах частот 500-6300 Гц

Из исследуемых ЗПМ пенопластовые вставки обладают лучшими звукоизоляционными свойствами, что, вероятно, обусловлено большей плотностью данного материала (табл. 1) относительно других ЗПМ. Потери при передаче звука у образцов типа «акустический поролон», «акустическая пена» и «пенные губки» практически одинаковы.

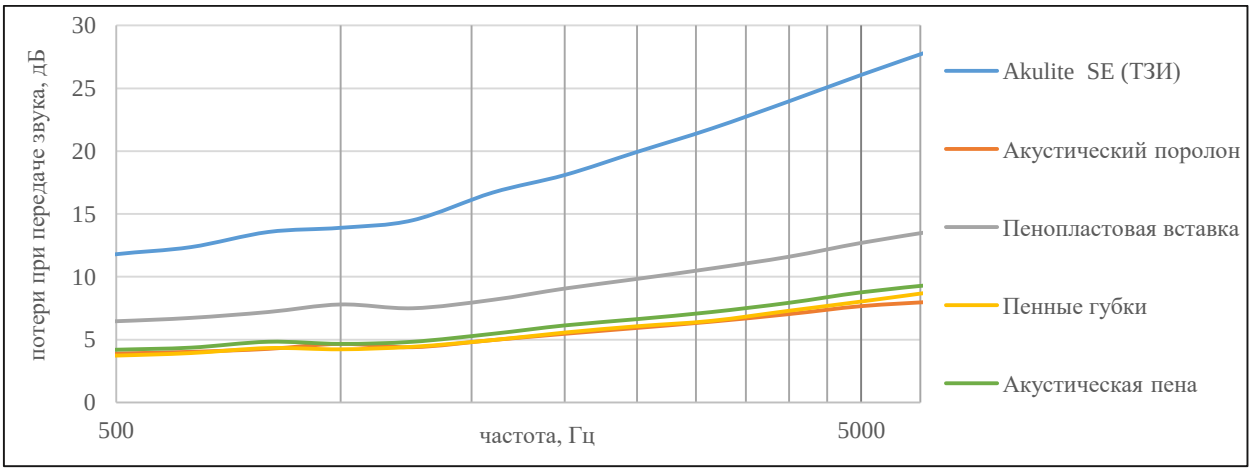


Рис. 4. Потери при передаче звука для различных материалов высотой 90 мм в третьоктавных полосах частот 500-6300 Гц

3 Результаты определения акустических свойств пакетов материалов суммарной высотой 90 мм

На рис. 5 представлен коэффициент звукопоглощения для пакетов материалов пенопластовая вставка + akulite SE в третьоктавных полосах частот 500-6300 Гц. Для пакета материалов наилучший коэффициент звукопоглощения (0,99) у комбинации 60 мм пенопластовая вставка + 30 мм akulite SE в третьоктавной полосе 800 Гц. Для пакета материалов 30 мм пенопластовая вставка + 60 мм akulite SE коэффициент звукопоглощения достигает 1 на частоте 2000 Гц.

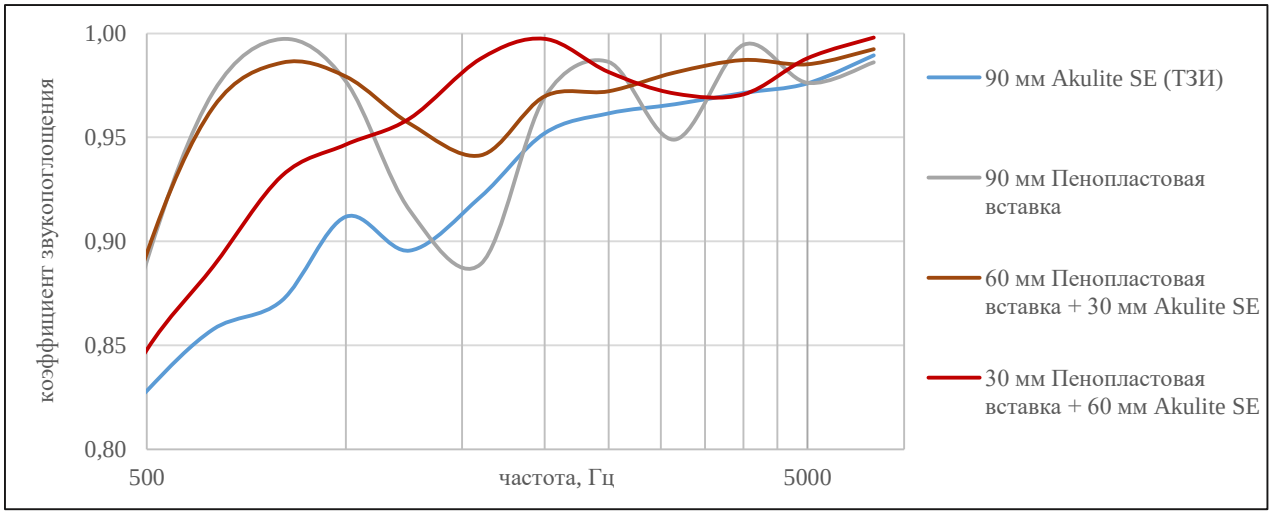


Рис. 5. Коэффициент звукопоглощения для пакетов материалов пенопластовая вставка + akulite SE в третьоктавных полосах частот 500-6300 Гц

На рис. 6 представлены потери при передаче звука для пакетов материалов пенопластовая вставка + akulite SE в третьоктавных полосах частот 500-6300 Гц. Потери при передаче звука для образца 90 мм akulite SE практически идентичны показателям пакета материалов 30 мм пенопластовая вставка + 60 мм akulite SE. Для комбинации 60 мм пенопластовая вставка + 30 мм akulite SE потери при передаче звука существенно ниже по сравнению с другим пакетом.

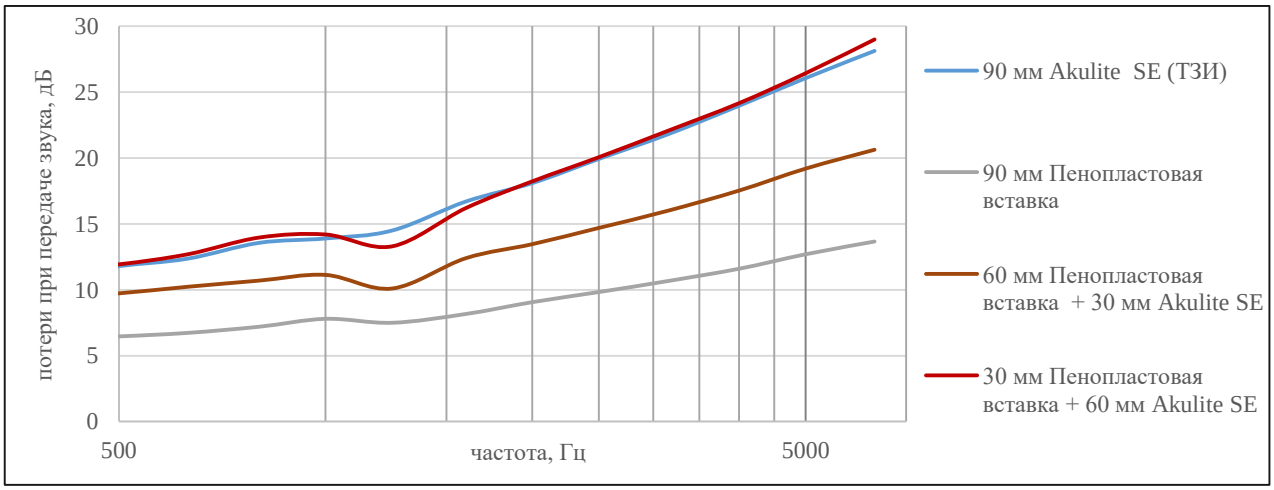


Рис. 6. Потери при передаче звука для пакетов материалов пенопластовая вставка + akulite SE в третьоктавных полосах частот 500-6300 Гц

Заключение

В результате экспериментальных исследований установлено:

- Для пакетов материалов ЗПМ+ТЗИМ звукоизоляционные свойства определяются преимущественно слоем ТЗИМ.

- Звукопоглощающие свойства пакета акустических материалов могут быть оптимизированы за счет выбора соотношения толщин слоев.

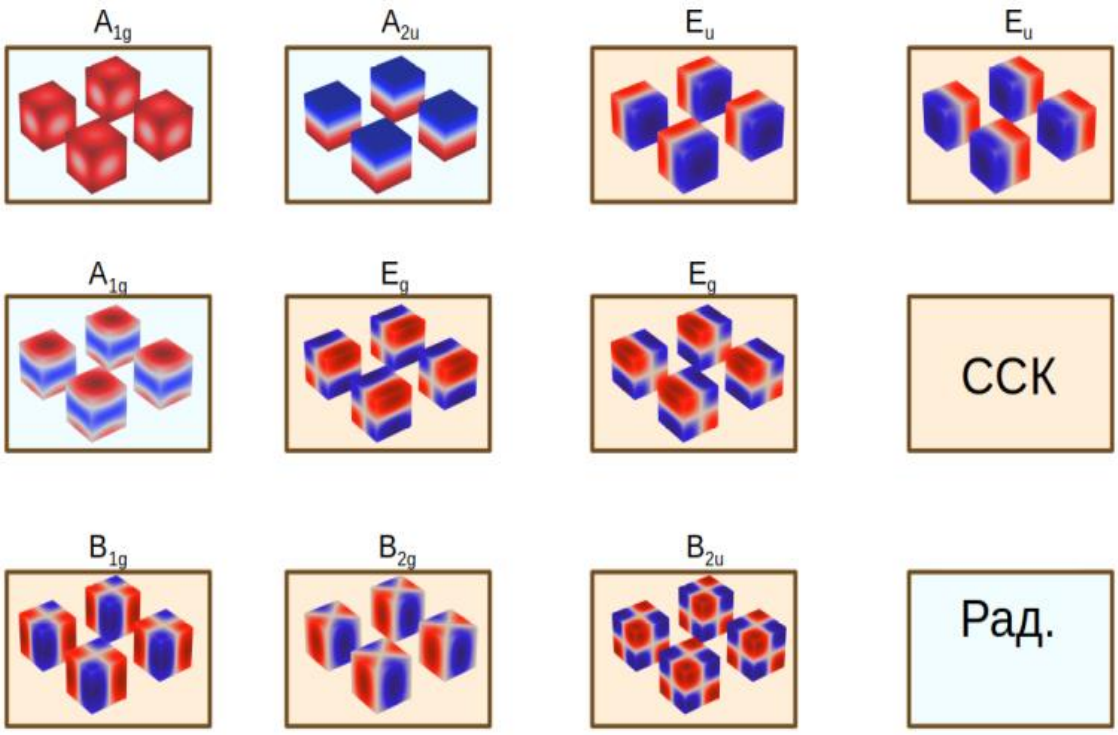
Полученные данные могут быть использованы для обоснованного выбора схемы размещения акустических материалов в бортовой конструкции самолета.

Список литературы

1. *Мошков П.А.* О разработке первого российско-китайского стандарта в области авиастроения ГОСТ Р 70066-2022 "Авиационная техника. Требования к акустическому проектированию пассажирского салона и кабины экипажа самолётов" // Динамика и виброакустика. 2024. **10**. № 2. С. 27-34.
2. *Мошков П.А.* Проблемы проектирования гражданских самолетов с учетом требований по шуму в салоне // Вестник МАИ. 2019. **26**. № 4. С. 28-41.
3. *Kuznetsov K., Lavrov V., Moshkov P., Rubanovsky V.* Designing of RRJ-95NEW-100 aircraft with regard to cabin noise requirements // Akustika. 2021. **41**. P. 36-41.
4. *Зверев А.Я., Черных В.В.* Определение акустической эффективности материалов и конструкций в лабораторных и натурных условиях. Часть 1. Звукопоглощение и звукоизоляция // Ученые записки ЦАГИ. 2018. **49**. № 8. С. 40-55.
5. *Шульдешов Е.М.* Звукоизоляционные свойства авиационных теплозвукоизоляционных материалов // Труды ВИАМ. 2019. № 12 (84). С. 37-45
6. *Зверев А.Я.* Экспериментальное определение сравнительной эффективности матов тзи из материалов «Микролайт», «БТМ-1», «АТМ-1МК» // Сборник Тезисов Всероссийского аэроакустического форума. 2021. С. 93-94.
7. *Зверев А.Я.* Механизмы снижения шума в салоне самолета // Акустический журнал. 2016. **62**. № 4. С. 474-479.
8. *Мошков П.А., Остроумов М.Н.* Исследование эффективности ТЗИ в акустической трубе четырехмикрофонным методом // Тезисы докладов XXI научно-технической конференции по аэроакустике. Москва, 2025. С. 119-120.
9. *Мошков П.А., Остроумов М.Н., Стрелец Д.Ю.* Создание в МАИ лабораторной базы для исследования акустических характеристик теплозвукоизолирующих и звукопоглощающих материалов // Динамика и виброакустика. 2025. **11**. № 3. С. 136-148.

Назад к содержанию секции

СЕКЦИЯ АКУСТИЧЕСКИЕ МЕТАМАТЕРИАЛЫ



назад к Содержанию

СОДЕРЖАНИЕ СЕКЦИИ АКУСТИЧЕСКИЕ МЕТАМАТЕРИАЛЫ

1. АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В АКУСТИКЕ: ДОСТИЖЕНИЯ И НОВЫЕ. ПРОБЛЕМЫ
Томилина Т.М.....637

2. ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СОЛИТОНОВ ДЕФОРМАЦИИ, РАСПРОСТРАНЯЮЩИХСЯ В МЕТАМАТЕРИАЛЕ, МОДЕЛИРУЕМОМ КАК ДВУХМАССОВАЯ ЦЕПОЧКА С ЦЕНТРОМ СИММЕТРИИ
Ерофеев В.И., Ильичев А.Т., Колесов Д.А. 644

3. НЕЛИНЕЙНЫЕ ЛОКАЛИЗОВАННЫЕ ВОЛНЫ ДЕФОРМАЦИИ В ОДНОМЕРНОМ АКУСТИЧЕСКОМ МЕТАМАТЕРИАЛЕ
Павлов И.С., Зайцев В.В. 646

4. КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОЙ МЕТАПОВЕРХНОСТИ НА ОСНОВЕ РЕЗОНАТОРОВ ГЕЛЬМГОЛЬЦА
Усачева И.А., Горшонков А.С., Костылев К.А., Салин М.Б. 647

5. ПРОСТАЯ МЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВАЖДЫ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ СРЕДЫ
Миронов М.А., Sazonov I.A. 653

6. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ МЕТАМАТЕРИАЛА СИНУСОИДАЛЬНОЙ ФОРМЫ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ ВИБРОМЕТРИИ
Агафонов А.А., Шараев П.А., Изосимова М.Ю., Безусов П.К., Кокшайский А.И., Одина Н.И., Коробов А.И. 659

7. КОНЕЧНО-РАЗМЕРНЫЕ ШУМОИЗОЛИРУЮЩИЕ МЕТАМАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ С-ОБРАЗНЫХ РЕЗОНАТОРОВ ГЕЛЬМГОЛЬЦА
Васильев Е.О., Красикова М.В.....665

8. СВЯЗАННЫЕ СОСТОЯНИЯ В КОНТИНУУМЕ В ПЕРИОДИЧЕСКИХ АКУСТИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ
Халяпин А.В., Ли Юн, Петров М.И., Богданов А.А. 666

9. СВЯЗАННЫЕ СОСТОЯНИЯ В КОНТИНУУМЕ В АКУСТИЧЕСКОМ ВОЛНОВОДЕ
Железнова А.С., Халяпин А.В., Ий Дзивей, Панкин П.С., Ли Юн, Петров М.И., Богданов А.А. 672

10. МОДАЛЬНО-СЕЛЕКТИВНАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛЕЙ ТИПА ARMA
Карпов И.А. 674

11. НЕПРЕРЫВНЫЕ И ДИСКРЕТНО-ВРЕМЕННЫЕ МОДЕЛИ ЛИНЕЙНЫХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ И АММ
Бобровницкий Ю.И., Карпов И.А.....675

УДК: 534.6.02 DOI: 10.34756/GEOS.2026.17.39559
PACS: 43.58.+z

Аддитивные технологии в акустике: достижения и новые проблемы

Т.М. Томилина[1,a]

[1] *Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук.*

Москва, Малый Харитоньевский пер., 4

E-mail: [a]*tatiana@imash.ac.ru*

Аннотация: Акустические метаматериалы, являясь по определению искусственными специально структурированными средами, предполагают не только разработку теоретических моделей, но и воплощение их в реальные объекты. В докладе рассматриваются результаты исследований по применению аддитивных технологий для изготовления тестовых образцов метаматериалов и обсуждается проблема расхождения в расчетных и экспериментальных характеристиках таких образцов. Отмечается, что одной из причин может являться недостаточная точность изготовления и численного моделирования физического эффекта в соответствии с предложенной концепцией метаматериала. Приводятся конкретные примеры решения акустической задачи поглощения звука на основе метаматериалов.

Ключевые слова: акустические метаматериалы, 3-D технологии

Additive technologies in acoustics: achievements and new challenges

T.M. Tomilina[1,a]

[1] *Mechanical Engineering Research Institute named after A.A. Blagonravov (IMASH).*

Moscow, Russia.

E-mail: [a]*tatiana@imash.ac.ru*

Abstract: Acoustic metamaterials, being by definition artificial specially structured medium, require not only the development of theoretical models, but also their implementation in real objects. This report examines the results of research on the use of additive technology to fabricate metamaterial test samples and discusses the potential discrepancy between the calculated and experimental characteristics of such samples. It is noted that one possible cause may be insufficient accuracy in fabrication and numerical modeling of the physical effect in accordance with the proposed metamaterial concept. Particular examples of solving the sound absorption problem using metamaterials made by additive technology are provided.

Введение

Появление аддитивных технологий (АТ) как новых методов производства существенно повлияло на развитие науки об акустических метаматериалах (АММ), причем эти два направления развиваются практически параллельно. Если в части создания концепций различных типов метаматериалов и их моделирования имеется значительный прогресс, то с реализацией пока есть проблемы. Наблюдаемый в последнее время всплеск публикаций в этой области обусловлен не только новыми технологиями, но и новыми компьютерными средами для конструирования и численного моделирования, а также современными средствами измерений, которые позволили провести реальное моделирование мета-поведения структур метаматериалов. Стало ясно, что не только реальные условия, их изменчивость, но и технология изготовления могут существенно снизить их эффективность. Для метаматериалов их возможности определяются как собственно материалом внутренней структуры, так и тем насколько точно спроектированы и выполнены геометрические структуры на микроуровне и насколько удачно выбраны технологические решения. В некоторых работах, например [1], утверждается, что выбор метода изготовления метаматериала является критически важным для получения предсказанного эффекта. В тематических публикациях наблюдается тенденция к объединению метаматериалов с другими областями технологий в попытке связать метаматериалы, построенные на предлагаемых принципах, с реальными практическими приложениями. В работе [2], выполненной в рамках европейского проекта DENORMS 2016-2020 (Designs for noise reducing materials and structures), приводятся результаты исследований сквозного процесса: моделирования, изготовления, экспериментального тестирования и валидации предложенной концепции адаптивного звукопоглощающего материала с периодической ячеистой структурой. Предложена типовая структура АММ-ячейки, позволяющая масштабирование, на которой изучалось 9 вариантов АТ и исследовались разные процессы. Микрогеометрия ячейки кубической формы представляла собой одну пору в центре ячейки, соединенную цилиндрическими каналами с 8 маленькими порами в углах ячейки и со своими аналогами в соседних ячейках. При исследовании образцов с ячейками размером 5 мм, изготовленных по технологии 3D-печати, отмечалось не очень хорошее совпадение расчетных характеристик с экспериментальными. В 2022 году был выпущен специальный номер журнала Американского акустического общества JASA [3], посвященный известным исследованиям как в области акустических метаматериалов, так и в области аддитивных технологий. Можно говорить о том, что применение АТ в акустике происходит в двух направлениях – это создание специальных акустических эффектов и сред и акустические методы контроля АТ процессов и соответственно изучение влияния самого АТ-процесса на свойства созданной акустической среды. Ниже в разделе 1 дается общее представление об аддитивных технологиях, а в разделе 2

рассматриваются разные варианты АММ звукопоглотителей, их функционал, методы их реализации. Приведены конкретные примеры применения аддитивных технологий PolyJet и селективного лазерного сплавления (СЛС) к изготовлению АММ тестовых образцов для задачи поглощения звука, анализируется их эффективность.

1 Аддитивные технологии и их реализация для АММ

Процессы проектирования и производства от концепции до реализации метаматериала имеют очень важное значение, поскольку в настоящее время неизвестно, в какой степени производственные допуски или дефекты будут влиять на целевое мета- поведение мета-материала, поэтому правильный выбор производственного процесса и оценка качества полученных образцов являются темами, которые требуют исследования. Следует отметить, что АТ-способ изготовления изделий обладает свойством универсальности – могут быть использованы разные материалы и воспроизведены сложные структуры, например, такие как периодические решетки [4], пространственно распределенные жесткости и даже дизайнерская пористость [5], что в свою очередь позволяет исследователям разрабатывать новые конструкции и материалы с мета- характеристиками, которые иначе реализовать невозможно.

Технологический АТ-процесс представляет собой пространственный процесс, в котором специально подготовленный материал (порошок или гель) добавляется выборочно в места заданного цифрового пространства для построения 3D объекта; в ряде случаев это выборочные места в слое порошкового материала и объект создается послойно (рис. 1), при этом в процессе выращивания объекта материал отверждается под действием разных источников излучения (лазерного, ультрафиолетового, микроволнового и т.п.). В АТ используется широкий спектр исходных материалов – металлы, пластмассы, пьезоэлектрики; АТ позволяют изготавливать изделия в масштабах от сантиметров до нанометров, и можно создавать различные среды со сложной структурой. В [4] представлен обзор проектирования, изготовления и получения особых механических характеристик решетчатых структур, построенных по технологии селективного лазерного сплавления (СЛС), который также может быть полезен для похожих структур АММ. С точки зрения технологии печати АММ образцы представляют собой тонкостенные многопрофильные изделия, а их акустические свойства существенно зависят от точности воспроизведения их формы. На рисунках 2 и 3 приведены примеры тестовых образцов АММ-звукопоглотителей (АММ-ЗП) с ячеистой внутренней структурой лабиринтного типа, которые изготовлены по аддитивным технологиям: PolyJet – образец из пластика (рис. 2, а) и СЛС – образец из металла (рис. 2, б) [6]. На рис. 3 показана АММ-ЗП панель и ее внутренняя структура (рис. 3, б), изготовленная по технологии СЛС.

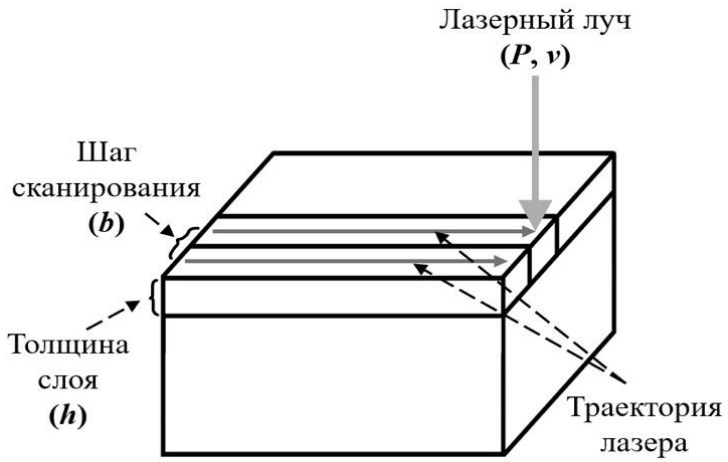
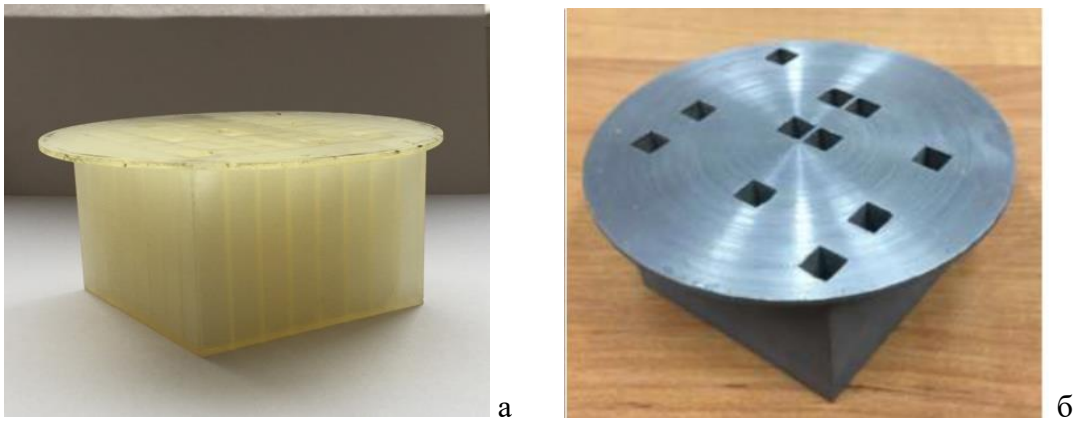


Рис. 1 Стратегия послойного сплавления образца из металлического порошка методом СЛС



а б

Рис. 2 Образцы АММ-ЗП1 размером 50х50х64 мм с толщиной стенок 1мм из пластика (а) и из металла (б), [6]

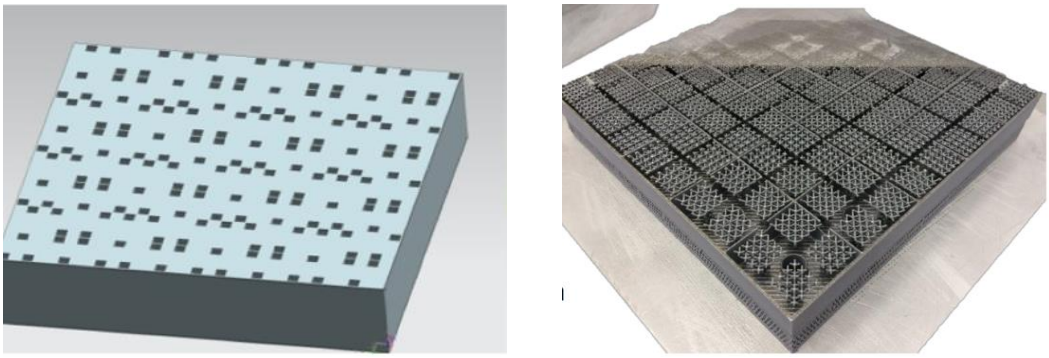
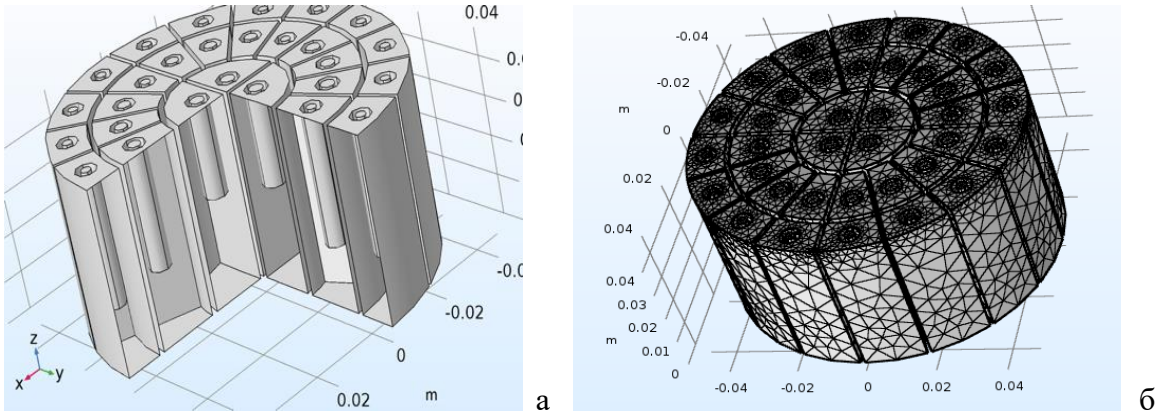


Рис. 3 3D модель образца – панели АММ-ЗП с ячеистой внутренней структурой лабиринтного типа размером 200х200х64 мм с толщиной стенок 1мм (слева) и его «напечатанная» внутренняя структура (справа)

2 АММ – звукопоглотители резонансного типа для низкочастотного диапазона

Концепция наилучшего поглотителя, сформулированная в рамках импедансной теории [7] – одна из концепций, которая может привести к практическим результатам, проверялась в лабораторном эксперименте, где исследовалась эффективность КП ЗП образцов со специально

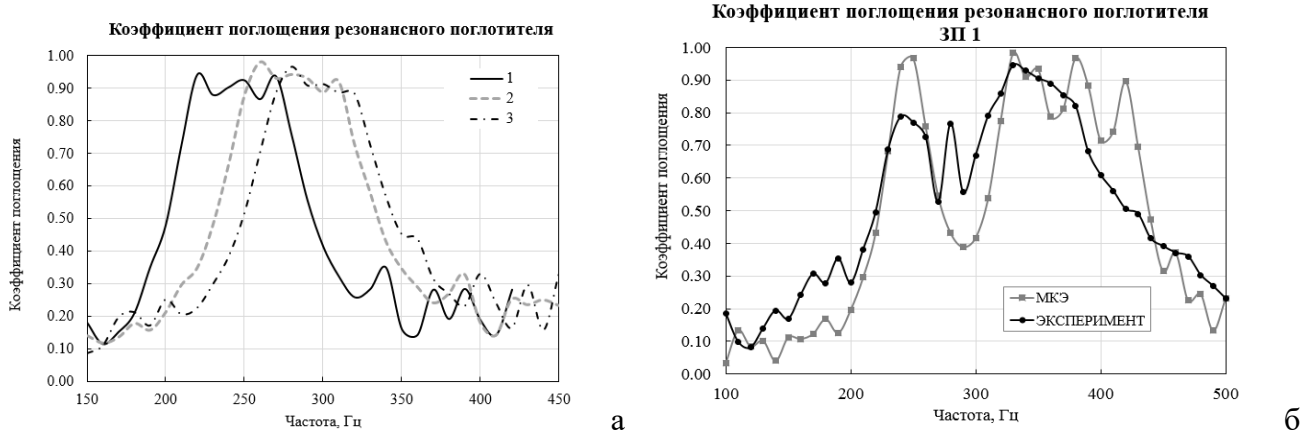
организованной внутренней структурой для низкочастотного диапазона. Резонансные звукопоглотители АММ-ЗП1 и АММ-ЗП2 на основе резонаторов Гельмгольца были разработаны для измерения коэффициента поглощения (КП) при нормальном падении акустической волны в трубе Кундта 4002 Bruel&Kjaer. АММ-ЗП1 имел ячеистую лабиринтную внутреннюю структуру из двух свернутых трубочек, а АММ-ЗП2 представлял собой замкнутый цилиндр диаметром 10 см и высотой 5 см с внутренней структурой из 36 трубочек – резонаторов Гельмгольца (показаны на рис. 2, а и на рис. 4, а) изготавливались по 3D технологии PolyJet.



а б

Рис. 4 Внутренняя структура образца резонансного звукопоглотителя с толщиной стенок 1мм (*а*) и сетка МКЭ (*б*), [8]

Размеры резонаторов рассчитаны на 3 резонансные частоты в диапазоне от 100 до 500 Гц, размеры трубочек: внутренние диаметры от 2.8 до 4 мм и длины от 25 до 35 мм. Настройка геометрических параметров поглотителя на различные диапазоны частот и численное моделирование экспериментальной установки по методу конечных элементов (МКЭ) выполнялись в компьютерной среде COMSOL Multiphysic. В МКЭ-модели были использованы уравнения гидродинамики для вязких сред с учетом эффекта потери энергии на стенках метаматериала за счет трения и теплопроводности. На рис. 5 приведены результаты расчета КП по МКЭ и аналитически, а также экспериментальные данные.



а б

Рис. 5 Расчетные зависимости КП образца АММ-ЗП1 от частоты для трех диапазонов частот: 220-270 Гц, 260-310 Гц и 270-320 Гц (*а*); МКЭ расчетные и экспериментальные зависимости КП АММ-ЗП2 от частоты (*б*)

Для анализа экспериментальных результатов по определению КП образцов АММ-ЗП в трубе Кундта в рассматриваемом диапазоне частот (100-500 Гц) была использована теоретическая модель [8], в которой полагалось, что длина акустической волны много больше характерных размеров ячеек-резонаторов и образец-поглотитель можно описать интегральной характеристикой – эффективным импедансом Z_{eff}, который равен отношению акустического давления падающей волны p к средней колебательной скорости v_{eff} на поверхности поглотителя: $Z_{eff} = p/v_{\text{eff}}$, $v_{\text{eff}} = \sum v_{\text{n}}\, S_{\text{n}}/S$, где v_{n} колебательная скорость воздуха в n-ом входном отверстии резонатора при заданной падающей волне с акустическим давлением p, S_{n} – площадь отверстия, S – площадь поверхности поглотителя. Коэффициент поглощения α рассчитывался как $\alpha = 1 - R^2$, где R – коэффициент отражения плоской акустической волны, который определяется через эффективный импеданс поверхности поглотителя Z_{eff}.

Дополнительно изучался вопрос влияния исходного материала для изготовления АММ-ЗП образцов, настроенных на 2 резонансные частоты (показаны на рис. 2, а, б) и качества изготовления с помощью 3D печати. Результат по коэффициенту поглощения для образца из пластика оказался лучше (рис. 6, а), чем для образца из металла (рис. 6, б).

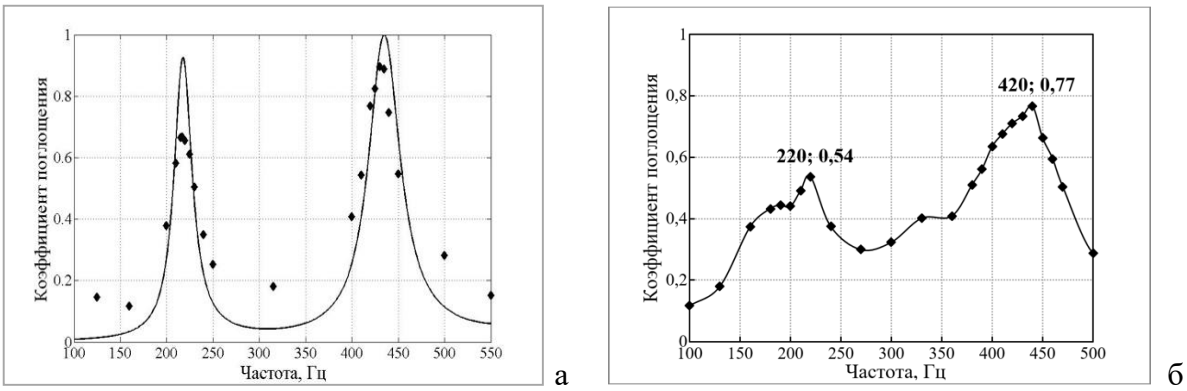


Рис. 6 Зависимости КП образца АММ-ЗП, настроенного на 2 частоты: 220 Гц, и 450 Гц; (а) – из пластика (сплошная линия – расчет, точки – эксперимент) и (б) – из металла: (сплошная линия с ромбами – эксперимент)

Что касается качества изготовления, то оказалось, что даже незначительные отклонения от заданной геометрии при печати могут привести к существенным изменениям зависимости КП от частоты – отдельные образцы теряли свои резонансные свойства [6].

Заключение

Обзор публикаций по применению аддитивных технологий в акустике показал осуществимость и потенциал предложенных концепций для звукопоглощающих материалов. Компьютерное моделирование в специальных цифровых средах сделало возможным сложный процесс проектирования и позволило правильно (хотя и не очень точно) прогнозировать свойства материалов со сложной внутренней структурой, спроектированных в компьютерных цифровых

средах и изготовленных по 3D технологиям. При этом отмечается, что за большинство расхождений между измерениями и прогнозами отвечает низкое качество 3D-печати исследуемых образцов, включая их постобработку. Опыт использования 3D печати для изготовления образцов АММ звукопоглотителей в ИМАШ РАН совместно с Самарским университетом показал, что для корректного воспроизведения внутренней структуры образцов необходимы специализированные методики, как в части моделирования заданной геометрии образца в цифровой среде принтера, его размещения на платформе построения, так и в части задания параметров технологического процесса. Задача состоит в том, чтобы выработать взаимно согласованные требования к структуре АММ и к процессу 3D печати на доступном оборудовании. Новые конструкции АММ должны разрабатываться и изготавливаться с использованием более совершенных методов и/или инструментов.

Работа выполнена за счет средств Государственного задания FFGU-2026-0002.

Список литературы

1. *M. Askari et al.* Additive manufacturing of metamaterials: A review. // Additive Manufacturing. 36 (2020) 101562.
2. *John Kennedy, Lara Flanagan, Luke Dowling et al.* The Influence of Additive Manufacturing Processes on the Performance of a Periodic Acoustic Metamaterial. // Int. J. Polymer Science. 2019, Article ID 7029143, 11 pages.
3. *Christina J. Naify*. Introduction to the special issue on Additive Manufacturing and Acoustics. //J. of the Acoust. Soc. of America. 2022. **151**, Issue 1. P. 387.
4. *Tobias Maconachie et al*. SLM lattice structures: properties, performance, applications and challenges. // Materials & Design, V 183: 108137, 2019.
5. *Opiela K.C., Rak M., Zielinski T.G.* A concept demonstrator of adaptive sound absorber/insulator involving microstructure-based modelling and 3D-printing. // Proceedings of ISMA2018 and USD2018, p.1091.
6. *Tomilina T.* 3D-Printing of vibro-acoustic metamaterials: the problem of model and experiment compliance. // Proceedings of ISMA2022 and USD2022, p.3119.
7. *Бобровницкий Ю.И.* Импедансная теория поглощения звука: наилучший поглотитель и черное тело // Акустический журнал. том 52, №6, 2006. с. 742-752.
8. *Асфандияров Ш.А.*, *Томилина Т.М.* Широкополосный резонансный звукопоглотитель на основе четвертьволновых резонаторов. // Сборник трудов XXXV сессии Российского акустического общества. Москва, 13–17 февраля 2023 г., С. 996.

DOI:10.34756/ GEOS.2026.17.39560

Исследование спектральной устойчивости солитонов деформации, распространяющихся в метаматериале, моделируемом как двухмассовая цепочка с центром симметрии

Ерофеев В.И.[1)], Ильичев А.Т.[2)], Колесов Д.А.[1)]

[1)] Институт проблем машиностроения РАН – филиал ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова – Грехова Российской академии наук», Нижний Новгород;

Тел.: +7(831) 432-0300; Факс: +7(831) 432-0300; E-mail: erof.vi@yandex.ru ; kolesov.d.a@yandex.ru

[2)] ФГБУН «Математический институт им. В.А. Стеклова Российской академии наук», Москва;

Тел.: +7(495) 984-8141; E-mail: ilichev@mi-ras.ru

Предложена математическая модель акустического метаматериала, представленного в виде нелинейно-упругой двухмассовой цепочки с центром симметрии. Модель была континуализирована и оказалась в длинноволновом приближении эквивалентной одной из разновидностей уравнения Буссинеска с квадратичной нелинейностью, содержащей, кроме одномерного оператора Даламбера относительно продольного перемещения и слагаемого, пропорционального четвертой производной от перемещения по пространственной координате, слагаемые, пропорциональные четвертой производной по времени и четвертой смешанной производной (второй по времени и второй по пространственной координате). Найдены точные аналитические решения этого уравнения в виде стационарных продольных волн деформации, которые могут быть как периодическими, так и апериодическими. Последние представляют собой пространственно-локализованные волны – солитоны. Для метаматериалов с «жесткой» нелинейностью (положительное значение коэффициента, характеризующего нелинейность) солитоны имеют отрицательную полярность, а для метаматериалов с «мягкой» нелинейностью (отрицательное значение коэффициента, характеризующего нелинейность) солитоны имеют положительную полярность. В обоих случаях на фоне солитонного решения проводилась линеаризация рассматриваемого нелинейного уравнения в частных производных, в результате которой было получено неоднородное скалярное линейное уравнение, приводящее к обобщенной спектральной задаче. Чтобы установить неустойчивость упомянутых уединенных волн, необходимо

убедиться в существовании неустойчивого собственного значения (собственного значения с положительной действительной частью). Соответствующее доказательство выполняется при помощи построения функции Эванса, которая зависит только от спектрального параметра. Эта функция является аналитической в правой комплексной полуплоскости и ее нули там совпадают с неустойчивыми собственными значениями. В частности, установлен тот факт, что функция Эванса на бесконечности стремится к единице. Это свойство функции Эванса, при определенных ее локальных свойствах в окрестности начала координат, позволяет сделать вывод о наличии ее нулей не положительной вещественной полуоси, а значит, о неустойчивости уединенной волны.

Работа Колесова Д.А. выполнена при поддержке гранта РНФ № 25-29-00675.

Ключевые слова: метаматериал, двухмассовая цепочка, центр симметрии, уравнение Буссинеска, солитон деформации, функция Эванса, неустойчивость.

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39561

Нелинейные локализованные волны деформации в одномерном акустическом метаматериале

Павлов И.С. [1]*, Зайцев В.В. [2]

[1] *Институт проблем машиностроения РАН - филиал ФИЦ ИПФ РАН, г. Нижний Новгород*

[2] *Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород*

*Тел. +7(831) 4322143; *E-mail: ispavlov@mail.ru*

Разработана одномерная модель акустического метаматериала “масса-в-массе”, представляющая собой цепочку сферических частиц двух сортов. Взаимодействия между частицами описываются квадратичным потенциалом, зависящим от изменения расстояния между частицами при их отклонениях от положения равновесия. Каждая частица обладает шестью степенями свободы: тремя трансляционными и тремя ротационными.

Получена система из 12 дифференциальных уравнений, описывающая распространение акустических и ротационных волн в данном метаматериале. Если в линейном приближении система распадается на 4 связанные подсистемы, то в нелинейном приближении становятся связанными продольные и ротационные волны. Данная подсистема может быть сведена к нелинейному эволюционному уравнению Бенджамина-Бона-Махони, показывающему, что при динамическом воздействии на метаматериал в нем могут формироваться пространственно-локализованные нелинейные волны деформации (солитоны).

Для подсистем связанных между собой продольных и ротационных, а также поперечных и ротационных волн найдены условия формирования связанных трехчастотных солитонов огибающих, т.е. волновых пакетов, сохраняющих свои амплитудно-фазовые профили при распространении в метаматериале благодаря компенсирующему действию нелинейных эффектов.

Работа выполнена при поддержке грантом Российского научного фонда (проект № 25-29-00675).

Ключевые слова: акустический метаматериал, цепочка сферических частиц «масса-в-массе», нелинейные акустические и ротационные волны, солитоны деформации

УДК: 534.2 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39562

Комплексное исследование акустической метаповерхности на основе резонаторов Гельмгольца

И.А. Усачева[1,a], А.С. Горшонков[1,b], К.А. Костылев[1,c], М.Б. Салин[1,d]

[1]*«Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова - Грехова Российской академии наук (ИПФ РАН)». г. Нижний Новгород, 603950, Россия.*

E-mail: [a]usacheva@ipfran.ru, [b]gorshonkov@ipfran.ru, [c]kostylev@ipfran.ru, [d]mikesalin@ipfran.ru

Аннотация: Работа посвящена исследованию акустической метаповерхности, состоящей из периодических резонаторов Гельмгольца, предназначенных для эффективного поглощения и рассеивания звуковой энергии. Выполнено численное моделирование и экспериментальные измерения, направленные на оценку эффективности структуры при различных углах падения волн и анализ диаграммы направленности рассеяния. Результаты расширяют понимание поведения метаповерхностей в реальных условиях и подтверждают их перспективное применение в инженерных задачах.

Ключевые слова: акустическая метаповерхность, резонаторы Гельмгольца, рассеивание и поглощение звука, численное моделирование, экспериментальные измерения

A comprehensive study of an acoustic metasurface based on Helmholtz resonators

I.A. Usacheva[1,a], A.S. Gorshonkov[1,b], K.A. Kostylev[1,c], M.B. Salin[1,d]

[1]*«Federal Research Center Institute of Applied Physics named after A.V. Gaponova-Grekhova of the Russian Academy of Sciences (IAP RAS)». Nizhny Novgorod, 603950, Russia.*

E-mail: [a]usacheva@ipfran.ru, [b]gorshonkov@ipfran.ru, [c]kostylev@ipfran.ru, [d]mikesalin@ipfran.ru

Abstract: The work is devoted to the study of an acoustic metasurface consisting of periodic Helmholtz resonators designed for the effective absorption and scattering of sound energy. Numerical modeling and experimental measurements were performed to evaluate the efficiency of the structure at various wave incidence angles and to analyze the scattering pattern. The results expand understanding of the behavior of metasurfaces in real conditions and confirm their potential applications in engineering tasks.

Keywords: acoustic metasurface, Helmholtz resonators, sound scattering and absorption, numerical modeling, and experimental measurements

PACS: 04.30.Nk

Введение

Актуальность исследования обусловлена широкой потребностью различных отраслей промышленности – от машиностроения и судостроения до гражданского строительства – в эффективных средствах снижения шума и вибраций. Помимо пассивной защиты, современные задачи требуют активного управления распространением акустической энергии, включая ее каналирование и селективное усиление. Перспективным решением в этой области являются акустические метаматериалы - композитные структуры с резонансными включениями.

Анализ литературы [1] демонстрирует широкий спектр интерпретаций термина «акустический метаматериал», объединяемых наличием в структуре характерной элементарной ячейки, сложность которой превышает сумму компонентов. Особенности метаматериалов включают анизотропию, отрицательные эффективные параметры плотности и упругости, управление направлением распространения волн и высокую эффективность поглощения энергии (причем в большинстве приложений речь идет именно о последнем). Их акустические свойства базируются на резонансных эффектах взаимодействия элементов массы и упругости, что позволяет использовать включения, размеры которых значительно меньше длины волны, концентрируя акустическое поле для усиленного поглощения на резонансных частотах. Если для гидроакустики типичными элементами являются пузырьки воздуха или полости в резиновых слоях, то для воздушной среды наиболее подходящим базовым элементом формирования ячейки выступают резонаторы Гельмгольца (РГ) [2].

В данной работе основное внимание уделено акустическим метаповерхностям с высокой поглощающей способностью и управляемым распространением волн, что обусловлено их высокой практической значимостью. Объектом исследования выбраны метаповерхности, представляющие собой слой периодически расположенных РГ. Они настроены на определенные резонансные частоты для обеспечения эффективного поглощения и рассеяния акустических волн в воздушной среде. В рамках исследования рассмотрены две конфигурации: полностью заполненные структуры, обеспечивающие максимальное поглощение, и периодические решетки, предназначенные для селективного рассеяния звука. Примером реализованной структуры служит полностью заполненная конфигурация площадью 0.7×0.7 м, включающая 761 резонатор Гельмгольца, настроенный на частоту 1220 Гц. На ее основе также была создана решетка с периодом 0.245 м. Данные образцы были изготовлены и исследованы в ИПФ РАН (см. рис. 1).

1 Методы исследования

Комплексный анализ исследуемых метаповерхностей включал два взаимодополняющих этапа: предварительное численное моделирование и последующие экспериментальные исследования. Такой подход позволил не только подтвердить теоретические предсказания, но и оценить практическую реализуемость предложенных конфигураций.

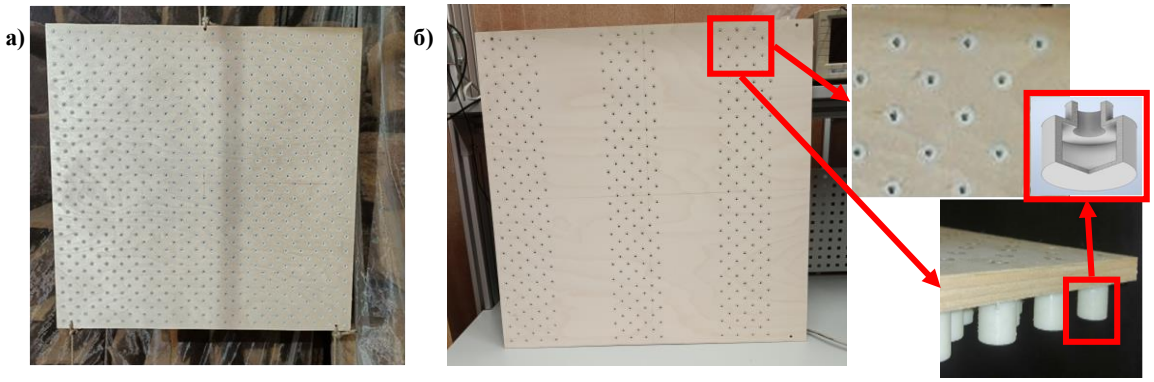


Рис. 1 – Геометрическая конфигурация типовой метаповерхности, созданной в рамках данного исследования в ИПФ в форме полностью заполненной структуры (а) и образованной из нее периодической решетки (б)

Численный анализ выполнялся методом конечных элементов (МКЭ) с использованием отечественного программного комплекса «САТЕС» [3], разработанного на базе ИПФ РАН. Расчетная схема задачи (см. рис. 2, *а*) включала три ключевых компонента: исходную метаповерхность, модель ограниченного сферического объема внешней среды и внешнюю границу, на которую накладывались поглощающие граничные условия. Для обеспечения точности расчетов была сгенерирована детализированная сетка, состоящая из прямоугольных элементов и параллелепипедов. Средний линейный размер элемента по сферическому объему составлял 10 мм, с локальным сгущением до 2 мм в области расположения резонаторов.

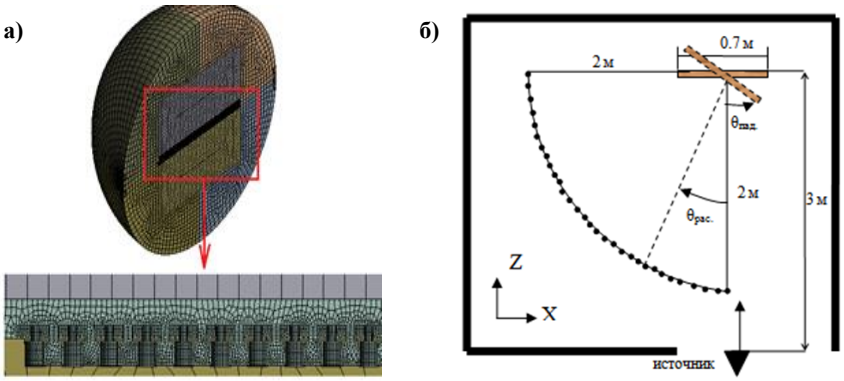


Рис.2 – Расчетная схема конечно-элементной модели метаповерхности с поглощающими граничными условиями (а) и схема экспериментальной установки в заглушенной камере ИПФ РАН с 32-элементной микрофонной антенной (б)

Для верификации результатов МКЭ и оценки точности моделирования была проведена серия контрольных экспериментов в заглушенной камере ИПФ РАН. В качестве источника акустического сигнала использовалась портативная колонка Soundcore Rave Mini, воспроизводившая пятиминутные записи, содержащие импульсы длительностью 2.5 мс в

частотном диапазоне от 500 до 2000 Гц. Регистрация рассеянных сигналов осуществлялась 32-элементной микрофонной антенной, расположенной по окружности радиусом 2 м. Геометрия антенны и конфигурация измерительной установки (см. рис. 2, *б*) позволяли восстанавливать диаграмму направленности рассеянного поля в заданном секторе.

2 Поглощающая способность метаповерхности

В продолжение изложенного, перейдем к анализу поглощающих характеристик полностью заполненной конфигурации метаповерхности. В качестве основной количественной меры эффективности использовалась частотная зависимость коэффициента поглощения, рассчитанная на основе диаграмм направленности (ДН), полученных как численно (МКЭ), так и экспериментально с угловым разрешением ~3°, при различных углах падения плоской волны. Для оценки вклада РГ в поглощение энергии анализировались значения акустического давления в направлении зеркального лепестка (то есть под углом 90° – $\theta_{пад.}$, где $\theta_{пад}$ – угол падения волны - см. схему на рис. 3). Диаграммы направленности метаповерхности с резонаторами нормировались относительно аналогичных характеристик гладкой пластины без резонаторов. Коэффициент поглощения α определялся по формуле:

$$\alpha = 1 - \frac{|p_{\mathrm{met}}^2|}{|p_{\mathrm{pl}}^2|}, \quad (1)$$

где p_{met} и p_{pl} - амплитуда рассеянного акустического поля для метаповерхности и гладкой пластины соответственно. В эксперименте из всего набора микрофонов, организованных в полукруглую решетку, выбирался тот, который находился напротив зеркального лепестка. Полученные зависимости коэффициента поглощения представлены на рис. 3. Анализ данных демонстрирует, что предложенная конфигурация обеспечивает высокую эффективность акустического поглощения в широком диапазоне углов падения волны. Использование массива резонаторов способствует практически полному поглощению энергии в резонансной полосе частот, при этом эффективность лишь незначительно снижается вне резонансного диапазона. Максимальное поглощение наблюдается на частоте, совпадающей с собственной резонансной частотой отдельного резонатора. При этом ширина полосы эффективного поглощения увеличивается благодаря взаимодействию осцилляторов в системе. Важно отметить, что результаты численного моделирования и экспериментальные данные находятся в хорошем количественном согласии, что подтверждает адекватность выбранной расчетной модели.

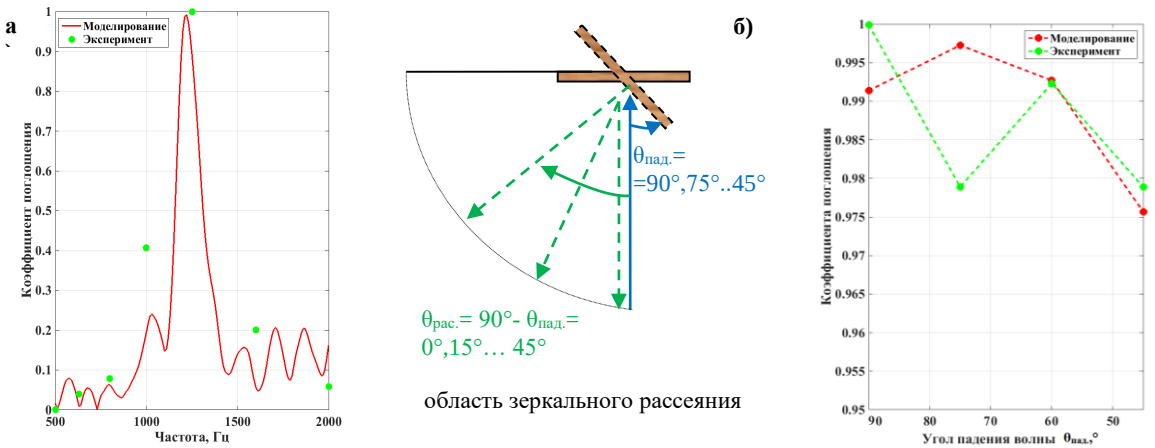


Рис. 3 – Частотная зависимость коэффициента поглощения при нормальном падении волны $\theta_{пад.}$= 90° (а) и его угловая зависимость на резонансной частоте (б)

3 Свойства периодических метарешеток

Рассмотрев поглощающие свойства сплошной метаповерхности, перейдем к анализу второй конфигурации – периодических решеток (метарешеток), образованных на базе исходной структуры. Такие системы аналогичны брегговским структурам и широко применяются в акустике для создания устройств, усиливающих или подавляющих звук на определенных частотах, что может найти применение в задачах звукоизоляции и управления акустическими потоками. Оптимальные параметры конфигурации определялись с помощью численного моделирования, включавшего расчет ДН рассеянного поля по описанной ранее расчетной схеме. Результаты исследования демонстрируют, что при определенном выборе периода решетки наблюдается значительное усиление сигнала в области обратного рассеяния в резонансном диапазоне частот (см. рис. 4, *а*) – фактически брэгговская дифракция. В ходе эксперимента образец облучался под одним углом падения, а рассеянный сигнал принимался под разными углами. Последовательный анализ микрофонов в полукруглой антенной решетке позволил получить диаграмму направленности, представленную на рис. 4, *б*.

Экспериментальные измерения подтвердили соответствие полученных результатов численным моделям. В рамках эксперимента исходная решетка сравнивалась с двумя контрольными образцами: повернутой структурой аналогичной геометрии (с «бороздами», ориентированными вдоль волнового вектора) – для подтверждения эффекта усиления поля именно за счет периодичности; и гладкой пластиной без резонаторных элементов – для оценки абсолютного уровня усиления сигнала в заданном направлении. Полученные результаты свидетельствуют о возможной перспективе использования разработанной решетки в области управления рассеянием и фильтрации акустических волн, однако для подтверждения ее

практической эффективности необходимо провести дополнительные исследования.

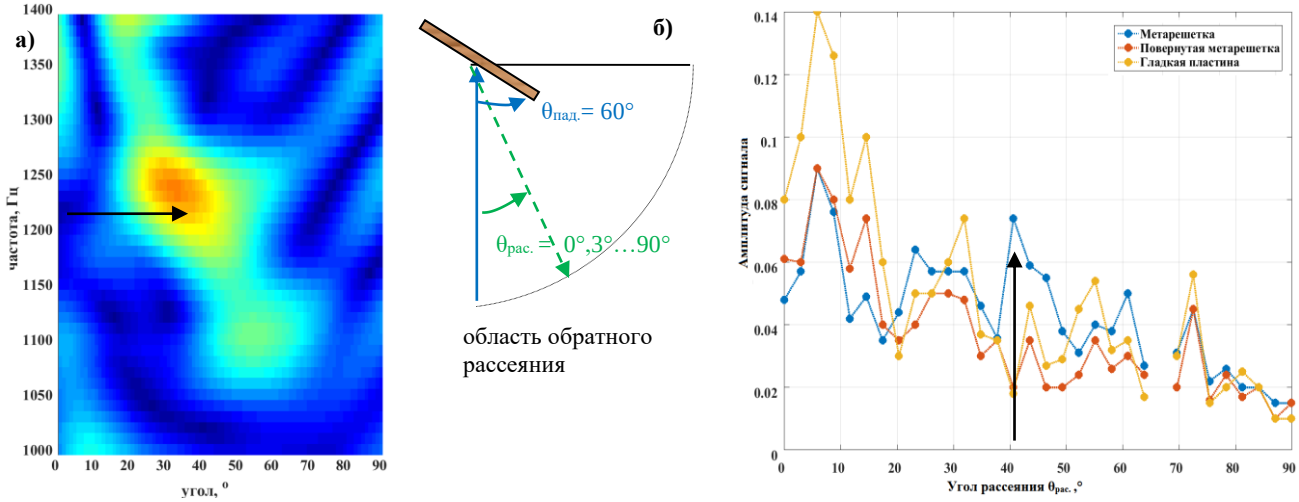


Рис. 4 – Распределение рассеянного метарешеткой акустического поля по частотам (по оси Y) и углам рассеяния $\theta_{рас.}$ (по оси X), полученное численно в «CATEC» (а) и экспериментально на резонансной частоте 1220 Гц (б) в сравнении с повернутой конфигурацией и гладкой пластиной. Здесь стрелочкой указано направление обратного рассеяния, в котором происходит усиление поля

Заключение

Подводя итоги проведенного исследования, можно констатировать, что в данной работе выполнено комплексное исследование акустических метаповерхностей на основе резонаторов Гельмгольца, демонстрирующих высокую поглощающую способность и возможность управления распространением акустической энергии. Сочетание численного моделирования методом конечных элементов и экспериментальных измерений в заглушенной камере подтвердило эффективность предложенных конфигураций в двух ключевых аспектах: резонансное поглощение – полностью заполненные структуры обеспечивают практически полное поглощение энергии в резонансном диапазоне частот; и управление рассеянием – периодические решетки позволяют достигать значительного усиления сигнала в заданных направлениях. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности разработанных метаповерхностей для практических приложений в акустической изоляции, фильтрации и управлении распространением звуковых волн в воздушной среде. Дальнейшие исследования могут быть направлены на оптимизацию геометрии резонаторов для расширения рабочей полосы частот и адаптацию структур для работы в различных средах.

Работа выполнена при поддержке госзадания ИПФ РАН, проект № FUFF-2024-0040.

Список литературы

1. *Бобровницкий Ю.И, Томилина Т.М.,*Поглощение звука и метаматериалы// Акустический журнал. 2018. **64**, № 5, С. 517-525.
2. *Комкин А.И., Миронов М.А., Быков А.И.*, Поглощение звука резонатором Гельмгольца // Акустический журнал. 2017. **63**, № 4, С. 356-363
3. Suvorov A.S., Sevriukov O.F.,. Sokov E.M, Salin M.B., Zaitseva S.G., Sharagina V. A., Software for Acoustic Design // Journal of Applied Mathematics and Physics. 2023. **11**, P. 2515-2522.

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39563

Простая механическая модель дважды отрицательной среды

Миронов М.А.[1)], Sazonov I.A.[2)]

[1)] АО «АКИН», Москва;

[2)] Swansea University, U.K.

E-mail: mironov_ma@mail.ru

Аннотация

Рассматривается модель дважды отрицательной среды в виде натянутой струны, к которой прикреплены резонаторы с двумя степенями свободы. Каждая из степеней свободы создает отрицательность квадрата волнового числа в определенной полосе частот. Определены параметры резонаторов, при которых эти полосы частот полностью совпадают, так что обеспечивается положительность квадрата волнового числа в этой полосе.

Ключевые слова: волноводная изоляция, дважды отрицательная метасреда.

PACS: 43.20.Bi

A simple mechanical model of a doubly negative medium

Mironov M.A.[1)], Sazonov I.A.[2)]

[1)] Andreev Acoustics Institute, Moscow;

[2)] Swansea University, U.K.

E-mail: mironov_ma@mail.ru

Abstract

A model of a doubly negative medium in the form of a stretched string connected with set of two degrees of freedom resonators is considered. Each set of resonators creates a negativity of the square of the wavenumber in a certain frequency band. The resonator parameters are determined at which these frequency bands completely coincide, so that the square of the wavenumber in this band is positive.

Keywords: waveguide insulation, doubly negative meta-media.

PACS: 43.20.Bi

Введение

В работе [1] получены и проанализированы уравнения изгибных колебаний стержня с натяжением, к которому прикреплены осцилляторы с двумя степенями свободы – поступательной и крутильной. Цель этой работы заключалась в демонстрации возможности увеличения ширины полосы запирания для изгибных волн по сравнению с классической теорией волноводной изоляции [2 - 4]. Автор [1] обратил внимание на то, что при перекрытии частотных полос, в

которых эффективная погонная масса и эффективное погонное натяжение стержня отрицательны, квадрат волнового числа оказывается положительным. Соответственно, запирание волн в этом частотном диапазоне отсутствует. С современной точки зрения такую конструкцию следует рассматривать как дважды отрицательную метасреду.

Дважды отрицательные среды в физике волновых процессов являются отдельным направлением современных исследований. Краткое описание первоначального развития этого направления дано, например в [5]. Следует отметить наглядную иллюстрацию истории вопроса, представленную в [5] на рис.1, где перечислены имена известных физиков, рассматривающих среды с одновременно отрицательными диэлектрической и магнитной проницаемостями. В акустике аналогами электромагнитных проницаемостей являются плотность и сжимаемость среды. Эффективная отрицательная сжимаемость, рассмотренная в [2 - 4], была впоследствии дополнена эффективной отрицательной плотностью [6 - 9]. Комбинация сред с двумя отрицательными параметрами в современную «метаматериальную» эпоху анализируется в ряде работ (см. напр. [10, 11, 12]). Следует отметить, что реализация среды, хотя бы, виртуальная, основанная на резонаторах, вмонтированных в среду-носитель, дает двойную отрицательность в узкой полосе частот. Конструкция, предложенная в [1], отличается тем, что используемые в ней резонаторы, аналогичные монополям и диполям [10, 11, 12], не имеют принципиальных ограничений на величины параметры и, поэтому, дают двойную отрицательность в широкой полосе частот. Это представляет определенный методический интерес при анализе эффектов в дважды отрицательных средах. В работе [1] решена задача о стержне с постоянным натяжением с присоединенными к нему резонаторами двух типов – поступательными и крутильными. Обнаружено, что наиболее отчетливо эффект отрицательности эффективной массы и отрицательной изгибной жесткости проявляется при переходе от модели стержня к модели струны. Для краткости в настоящем докладе сразу рассматривается именно модель струны с двумя типами резонаторов.

1 Уравнение натянутой струны с резонаторами

На рис.1 изображена рассматриваемая модель.

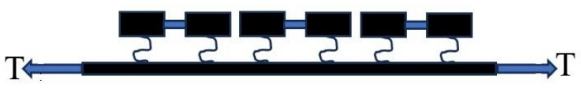


Рис.1 - Механическая модель струны с резонаторами.

К струне прикреплены массы на пружинах, при этом массы попарно соединены жесткими невесомыми стержнями. Каждая пара масс имеет две степени свободы – поступательную (по нормали к струне) и вращательную. Масса и

момент инерции пары, приходящиеся на единицу длины струны, обозначены через ρ_0 и I_0 . Обе степени свободы имеют эффективные жесткости κ_n, κ_k, так что образуются поступательные и крутильные резонаторы с парциальными резонансными частотами $\omega_n = \sqrt{\kappa_n/\rho_0}$, $\omega_к = \sqrt{\kappa_k/I_0}$. Уравнения движения струны записывается следующим образом:

$$w' = \varphi,\ \ Q = M_n,\ Q' + T \cdot \varphi' = -\rho\omega^2 w + Q_k. \qquad (1)$$

Штрих обозначает дифференцирование. w – поперечное смещение струны, φ – наклон оси струны, ρ – погонная масса струны, Q – перерезывающая сила, T – сила натяжения, Q_n – дополнительная поперечная сила взаимодействия поступательного резонатора с поперечным смещением струны w, M_k – момент взаимодействия крутильного резонатора с наклоном струны φ. Их взаимодействия описываются уравнениями:

$$Q_n = \frac{\rho_0\omega^2}{\frac{\omega^2}{{\omega_n}^2} - 1} w, \qquad M_k = \frac{I_0\omega^2}{\frac{\omega^2}{{\omega_к}^2} - 1} \varphi \qquad (2)$$

Решение системы (1, 2) ищется в виде бегущей волны с волновым числом $k(\omega)$:

$$w = Aexp(ikx) \qquad (3)$$

Остальные переменные выражаются через w. Для волнового числа получается дисперсионное уравнение:

$$(T + \Delta T(\omega))k^2 - \big(\rho + \Delta\rho(\omega)\big)\omega^2 = 0 \qquad (4)$$

Резонаторы дают добавки в натяжение струны и в ее плотность:

$$\Delta T(\omega) = \frac{I_0\omega^2}{\frac{\omega^2}{{\omega_k}^2} - 1}, \qquad \Delta\rho(\omega) = -\frac{\rho_0}{\frac{\omega^2}{{\omega_n}^2} - 1} \qquad (5)$$

Дисперсионное уравнение (4) имеет решения:

$$k^2 = \frac{1 - \frac{\rho_0/\rho}{\frac{\omega^2}{{\omega_n}^2} - 1}}{1 + \frac{\kappa_k}{T}\frac{\omega^2/{\omega_k}^2}{\frac{\omega^2}{{\omega_k}^2} - 1}} \cdot \frac{\omega^2}{c^2} \qquad (6)$$

$c^2 = \frac{T}{\rho}$ – скорость распространения волны в исходной струне.

Далее вводятся безразмерные частоты и другие параметры задачи. Во-первых, частота и резонансная частота крутильных резонаторов нормируется на резонансную частоту поступательных резонаторов ω_n: $\Omega = \omega/\omega_n$, $\Omega_k = \omega_k/\omega_n$. Погонная плотность резонаторов нормируется на плотность струны: $\Pi_0 = \frac{\rho_0}{\rho}$. Жесткость крутильных резонаторов нормируется на силу натяжения струны: $q_k = \frac{\kappa_k}{T} = \frac{\kappa_k}{\rho c^2}$. Волновое число нормируется на волновое число струны без резонаторов: $\mathrm{K} = \frac{k}{\omega/c}$. В результате дисперсионное уравнение перепишется:

$$K^2 = \frac{1 - \dfrac{\Pi_0}{\Omega^2 - 1}}{1 + q_k \dfrac{\Omega^2}{\Omega^2 - {\Omega_k}^2}} \qquad (7)$$

2 Анализ дисперсионного уравнения

Квадрат волнового числа K^2 как функция частоты Ω^2 зависит от трех параметров: Π_0. – погонной плотности резонаторов, Ω_k - отношению крутильной резонансной частоты к поступательной резонансной частоте, q_k - отношению жесткости пружин к силе натяжения струны. Рассмотрим поведение числителя и знаменателя при изменении Ω. На нулевой частоте числитель положителен и равен $1 + \Pi_0$. При увеличении частоты он возрастает и обращается в $+\infty$ при $\Omega = 1$. Далее из -∞ он увеличивается, проходит через ноль при $\Omega^2 = 1 + \Pi_0$ и при стремлении Ω^2 к $+\infty$ стремится к 1. Знаменатель при нулевой частоте равен 1, при увеличении частоты обращается в нуль при $\Omega^2 = \frac{{\Omega_k}^2}{1+q}$, обращается в - ∞ при $\Omega^2 = {\Omega_k}^2$, при переходе через ${\Omega_k}^2$ он обращается в $+\infty$ и при дальнейшем увеличении Ω^2 стремится к $1 + q$. Поведение числителя и знаменателя показаны на рис. 2 для конкретных значений $\Pi_0 = 3$, $\Omega_k = 2$, $q = 1$. При этих значениях параметров интервалы отрицательности числителя и знаменателя не совпадают.

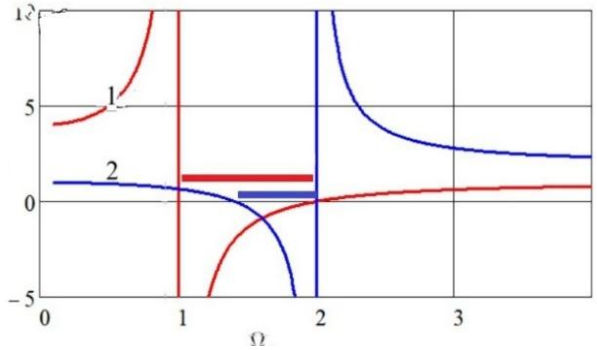


Рис.2 – Числитель 1 и знаменатель 2 формулы зависимости квадрата волнового числа от частоты (7). Отрезками показаны интервалы отрицательности числителя и знаменателя.

Приравнивая верхние и нижние границы отрицательности числителя и знаменателя, получаем условия совпадения интервалов отрицательности:

$$\Pi_0 = q \tag{8}$$

$$\Omega_k = \sqrt{1+q} \tag{9}$$

Такой выбор параметров дает полосу частот, одновременной отрицательности эквивалентных плотности и натяжения струны $\Omega_{low} \le \Omega \le \Omega_{High}$, где $\Omega_{low} = \frac{1}{\sqrt{1+q}}$, $\Omega_{high} = \sqrt{1+q}$:

$$\frac{\Omega_{High}}{\Omega_{low}} = 1 + q \tag{10}$$

На рисунке 3 представлены соответствующие графики для нескольких значений параметра q и при выполнении условий $(8, 9)$. Чтобы были видны обе границы дважды отрицательности (на нижней границу квадрат волнового числа обращается в ∞), формула (7) умножена на $\left|\Omega^2 - \frac{1}{1+\text{й}}\right|$.

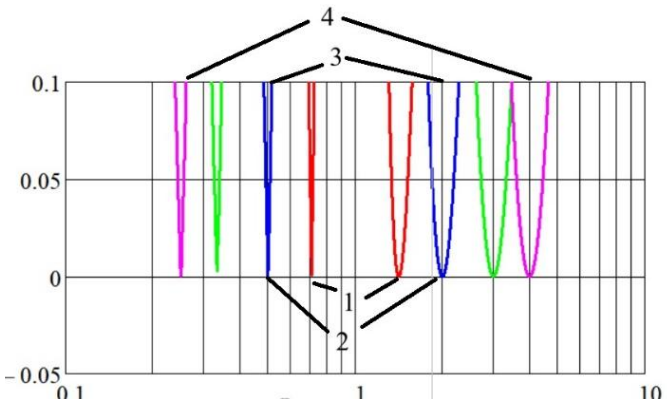


Рис.3 – Частотные границы дважды отрицательности для q=1

Ширина полосы (10) для $q = 1, 3, 7, 15$ равна $\frac{\Omega_{High}}{\Omega_{low}} = 2, 4, 8, 16$ соответственно. Так как подбор параметров обеспечивает совпадение интервалов отрицательности числителя и знаменателя в (7), переход между дважды положительной и дважды отрицательной средами происходит без промежуточных частотных зазоров, в которых происходит запирание.

3 Заключение

Разработанная в 60-е годы теория волноводной изоляции [2 - 4, 6 - 9] использовала понятия отрицательные упругости и отрицательные плотности для физического объяснения эффекта запирания волны в волноводе. Модель, предложенная в [1], содержит два типа резонаторов, прикрепленных к струне, и теоретически реализует дважды отрицательную среду. В [1] показано, что на частотах, для которых по отдельности отрицательные плотность и упругость дают запирание, при их совместном действии волновод оказывается незапертым. В настоящем докладе получены связи механических параметров модели [1] и ее характеристик как акустической

метасреды. Определены условия, при которых ширина полосы дважды отрицательности максимальна. Представляется, что эта модель, благодаря ее «механистичности», будет удобна при рассмотрении различных эффектов в дважды отрицательных средах.

Список литературы

1. *Сазонов И.А.* Учет крутильных колебаний осцилляторов в волноводных виброизоляторах // Акуст. ж. 1986. Т. 33. №6. с.1117 – 1118.

2. *М.А. Исакович.* Теория волноводной изоляции в длинных линиях // VI Всесоюзный симпозиум по дифракции и распространению волн (Цахкадзор, 1973). Краткие тексты докладов, Книга 2, секция 2В’, Москва-Ереван, Ереван, 1973, с. 105 - 108.

3. *Исакович М. А., Кашина В. И., Тютекип В. В.* Волноводная изоляция нагибных волн // VIII Всесоюзной Акуст. копф. М.: АКИН. 1973.

4. *Исакович М. А., Кашина В. И*., *Тютекип В. В.* Экспериментальные исследования виброизоляции изгибных волн, создаваемой импедансиыми системами/ /Акуст. жури. 1982. Т. 28. № 4. С. 547-550.

5. *Веселаго В.Г.* Электромагнитные и акустические волны в метаматериалах и структурах // Успехи физических наук 2011. Т.181, № 1, С. 1201 – 1205.

6. *Викторова Р.Н., Тютекин В.В.* Экспериментальное исследование искусственной акустической среды с комплексной плотностью // Труды VI Всесоюзной Акуст. конф. М., 1967.

7. *Вовк А.Е., Викторова Р.Н.* О возможности приближенного расчета эффективной плотности упругой среды с твердыми включения // Труды Акуст. инст. Т. 10. 1971.

8. *Викторова Р.Н.* Исследование искусственной акустической среды из резиноподобного материала с твердыми цилиндрическими включениями // Труды VIII Всесоюзной Акуст. конф. М., 1973.

9. *Р.Н. Викторова, В.В. Тютекин.* Физические основы создания звукопоглощающих материалов с использованием среды с комплексной плотностью // Акуст. ж., 1998, том 44, № 3, с. 331 - 336.

10. *Chan C.T. LI Jensen, Fung K.H.* On extending the concept of double negativity to acoustic waves // J Zhejiang Univ SCIENCE A 2006 7(1):24-28.

11. *Буров В.А., Дмитриев К.В., Сергеев С.Н.* Акустические «дважды отрицательные» среды // Акуст. ж., 2009, том 55, №3, с. 292 - 306.

12. *Федотовский В.С.* Пористая среда как акустический метаматериал с отрицательными инерционными и упругими свойствами // Акуст. ж., 2018, том 64, с. 547 - 553.

УДК: 534.2. DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39564

Экспериментальное исследование упругих колебаний элементов метаматериала синусоидальной формы методом лазерной виброметрии

Агафонов А.А., Шараев П.А., Изосимова М.Ю., Безусов П.К., Кокшайский А.И., Одина Н.И., Коробов А.И.

МГУ имени М.В. Ломоносова, физический факультет, кафедра акустики, город Москва.

Тел.: 8(977)119-3843; E-mail: sharaevpa@my.msu.ru

Аннотация: Представлены результаты экспериментов по исследованию упругих колебаний элементов метаматериала синусоидальной формы методом лазерной сканирующей виброметрии. В стержнях прямоугольного сечения, изготовленных методом 3D-печати из фотополимера и имеющих периодические углубления по синусоидальному закону, исследованы дисперсия скорости и формы мод упругих колебаний. Проведено сравнение с контрольным образцом прямоугольной формы. Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова.

Ключевые слова: моды упругого стержня, лазерная виброметрия, эксперимент

Experimental study of elastic oscillations of metamaterial elements of sinusoidal shape by laser vibrometry

A.A. Agafonov, P.A. Sharaev, M.Yu. Izosimova, P.K. Bezusov, A.I. Kokshayskiy, N.I. Odina., A.I. Korobov

Department of Acoustics, Faculty of Physics, M.V. Lomonosov Moscow State University.

Moscow 119991, Russia.

E-mail: sharaevpa@my.msu.ru

Abstract: The results of the experimental study of elastic vibrations of sinusoidal-shaped metamaterial elements using laser scanning vibrometry are presented. The dispersion of velocity and the shapes of elastic vibration modes were studied in rectangular-section rods made using 3D printing from a photopolymer and having periodic recesses according to a sinusoidal law. A comparison was made with a rectangular-shaped control sample. The research was carried out within the framework of the state assignment of the Lomonosov Moscow State University.

Keywords: modes of an elastic rod, laser scanning vibrometry, experiment

PACS: 43.35.Cg.

Введение

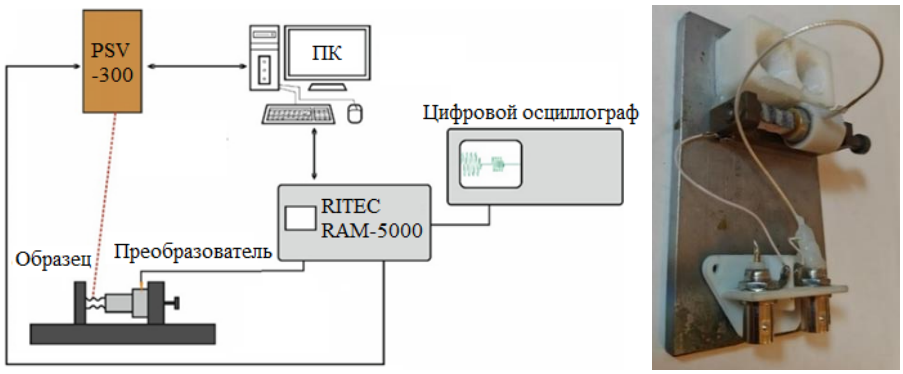
Метаматериалы – это искусственно создаваемые структуры из ячеек малых волновых размеров («метаатомов»), которые могут иметь такие эффективные свойства, какие даже не встречаются в природе [1-6].

Особое место занимают синусоидальные элементы, представляющие собой волнообразно изогнутые структуры [7]. Такая геометрия позволяет эффективно управлять распространением упругих волн на низких частотах, формировать широкие запрещённые зоны и обеспечивать поглощение вибраций [8] в метаматериалах. В отличие от прямолинейных балок, синусоидальная форма приводит к преобладанию деформации растяжения или сжатия над деформацией изгиба, что приводит к возможности получения механически настраиваемых свойств, включая изменение коэффициента Пуассона от отрицательных до положительных значений во всей конструкции [9]. В таких метаматериалах выделяют изгибные, продольные и крутильные моды. Изгибные моды преобладают на низких частотах и связаны с локальным изгибом синусоидальных элементов [10]. При увеличении отношения амплитуды выемки к длине волны происходит изменение механизма деформации: изгиб уступает место растяжению, жёсткость возрастает, а собственные частоты всей системы сдвигаются вверх [11].

Задачей настоящего исследования является определение собственных частот метаатомов в виде брусков с антисимметричными синусоидальными выемками и их упругих свойств с целью дальнейшего их использования для конструирования метаматериала.

Образцы, установка и методика измерения

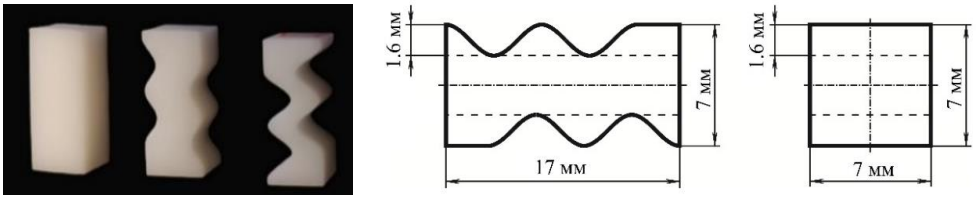
Непрерывный электрический сигнал, генерируемый источником RIGOL DG1022 (при измерениях в непрерывном режиме), или импульсный электрический сигнал, генерируемый ультразвуковым измерительным комплексом RAM-5000 SNAP SYSTEM, Ritec (при измерениях в импульсном режиме), поступал на пьезокерамический преобразователь, плотно прижатый к исследуемому образцу. Колебания поверхности образца регистрировались с помощью лазерного сканирующего виброметра PSV-300 (Polytec), позволяющего измерять и визуализировать амплитуду нормальной компоненты колебательной скорости волны в заданных точках поверхности исследуемой структуры. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1, *а*.



(а) (б)

Рис. 1. Схема экспериментальной установки (а) и экспериментальной ячейки (б).

С помощью 3D-печати из фотополимера ANYCUBIC Standard Resin White был изготовлен ряд экспериментальных образцов (см. рис. 2, *а, б*) в форме прямоугольных параллелепипедов с размерами 7 мм × 7 мм × 17 мм, в одной из пар противоположных граней которых были сделаны периодические выемки синусоидального профиля с фиксированной глубиной, отличной для каждого из образцов: от 0 мм (контрольный образец) до 3.2 мм.



(а) (б)

Рис. 2. Экспериментальные образцы: (а) с глубиной выемок 0, 0.8 и 3.2 мм; (б) – схема образца с глубиной выемки 1.6 мм.

Образцы зажимались в экспериментальной ячейке, изображенной на рис. 1, *б*, которая состояла из массивного основания, зафиксированных на нём гнёзд заземления и электрического контакта с выводами на прикреплённый пьезокерамический преобразователь и фиксатор для экспериментальных образцов, позволяющий регулировать степень поджатия образцов специальным ручным винтом.

Результаты экспериментальных исследований

Были получены АЧХ образцов с выемками глубиной 0.8 мм и 1.6 мм и контрольного образца в полосе частот от 40 до 900 кГц, а также АЧХ преобразователя (рис. 3, *а, б*).

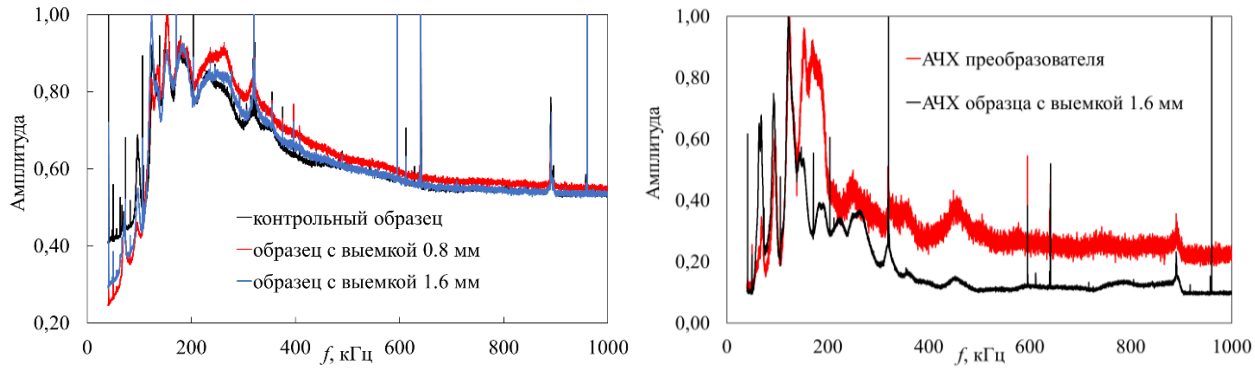
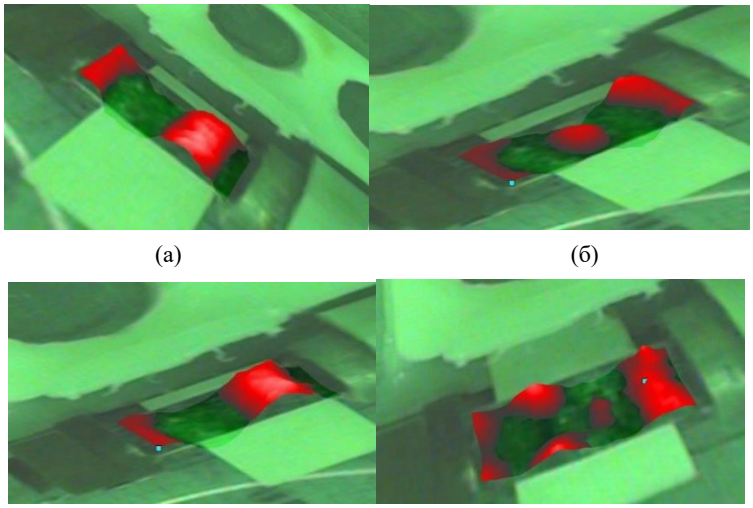


Рис. 3. а) АЧХ трёх образцов: с глубиной выемок 0.8 мм и 1.6 мм и контрольного образца. б) АЧХ преобразователя.

Как видно на рис. 3, обнаруженные резонансные частоты, не связанные с шумовым фоном, расположены на частотах ниже 400 кГц. Оказалось также, что только некоторые частоты не совпадают с резонансными частотами используемого в эксперименте преобразователя, т.е. являются собственными частотами образца.

Визуализации колебательной скорости стоячих волн на некоторых из этих частот, для образцов с разной глубиной выемки представлены на рис. 4. Данные картины визуализации на рис. 4, *а, в* позволили определить количество длин волн, укладывающихся на длине образца, для соответствующих собственных частот. Затем по известным частотам и длинам стоячих волн были определены скорости распространения упругих волн.



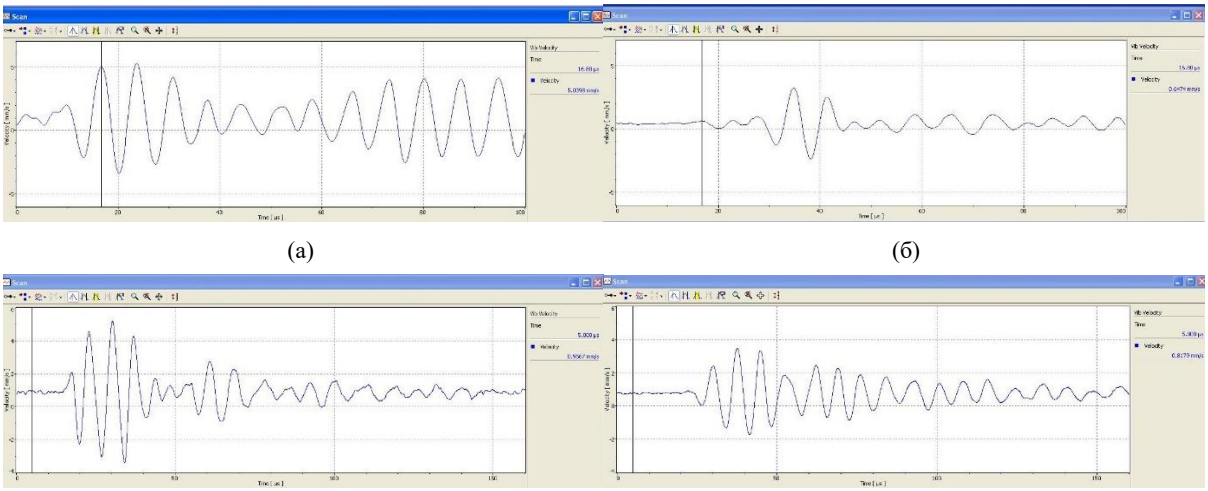
(а) (б)

(в) (г)

Рис. 4. Визуализация мод на частотах 125.23 (а) и 151.33 (б) для контрольного образца, и мод на частотах 125.55 (в) и 182.5 кГц (г) для образца с выемкой 1.6 мм

Однако было замечено, что на частотах выше 170 кГц форма колебаний образца становится сильно искаженной по сравнению с обыкновенной стоячей волной синусоидальной формы, из-за чего оценить скорость данным способом не представлялось возможным.

Поэтому на более высоких частотах для определения скоростей измерялось время распространения импульса, положение которого оценивалось с помощью картин визуализаций его распространения. Тем не менее, и данный метод имел свои ограничения: в связи с малой длиной образцов, форма исходного импульса довольно быстро сильно искажалась из-за возникающих отражений от противоположного конца образца. Данный эффект был особенно заметен на частотах 400 кГц и ниже. На рис. 5 представлены осциллограммы импульса на одной из резонансных частот, 125.55 кГц, в начале образца и на его конце.



(а) (б)

(в) (г)

Рис. 5. Осциллограммы импульса на частоте 125.55 кГц: (а) в начале контрольного образца, (б) в конце контрольного образца; (в) в начале образца с выемкой 1.6 мм; (г) в конце образца с выемкой 1.6 мм.

Были получены экспериментальные дисперсионные кривые для образцов с разной глубиной выемки (см. рис. 6).

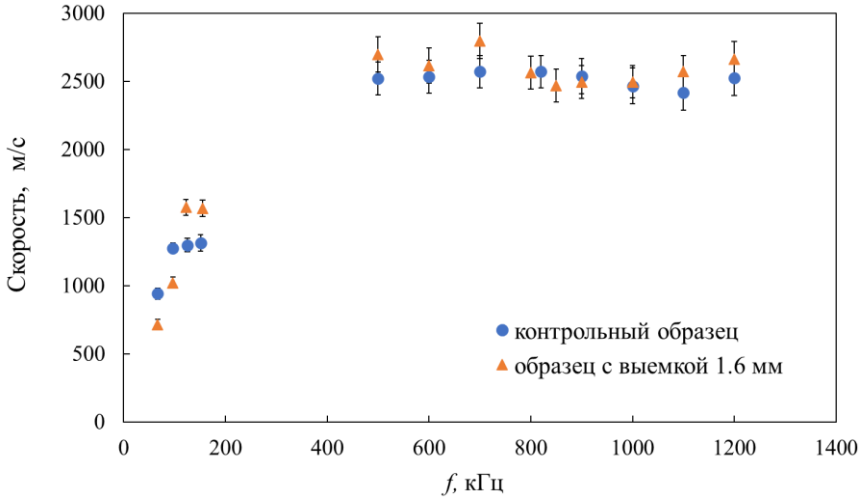


Рис. 6. Дисперсионные кривые для образца с выемкой 1.6 мм и контрольного образца.

В исследуемом диапазоне частот величины скорости распространения волн в контрольном образце и в образце с выемкой 1.6 мм изменяются, следовательно образцы обладают дисперсией. На частоте 66.72 кГц величины скоростей в контрольном образце и в образце с выемкой 1.6 мм соответственно равны 943±40 м/с и 717±40 м/с, а на частоте 1000 кГц – 2469±120 м/с и 2499±120 м/с. То есть скорости в образцах возросли с увеличением частоты соответственно на 161 % и на 249%.

Заключение

В работе представлены результаты экспериментального исследования распространения упругих волн в брусках с периодически изменяющимся профилем на основе визуализации колебаний поверхности бруска методом лазерной сканирующей виброметрии. В непрерывном и импульсном режимах визуализированы упругие волны, распространяющиеся в ряде образцов, напечатанных на 3D-принтере из фотополимера в форме прямоугольных

параллелепипедов, в одной из пар противоположных граней которых были сделаны выемки синусоидального профиля фиксированной глубины. Получены АЧХ на различных гранях образцов с разной глубиной выемки в диапазоне от 40 до 900 кГц и произведен анализ полей колебательной скорости упругих мод. Измерены скорости распространения для ряда частот в образцах с различной глубиной выемки. Данный объект можно использовать в качестве метаатома на частотах ниже 100 кГц.

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова.

Список литературы

1. *Бобровницкий Ю.И., Томилина Т.М.* Поглощение звука и метаматериалы (Обзор) // Акуст. журн. 2018. **64**. № 5. С. 517-525.

2. *Fang N., Xi D., Xu J., Ambati M., Srituravanich W., Sun C., Zhang X.* Ultrasonic metamaterials with negative modulus // Nat. Mat. 2006. **5**, N 6. P. 452-456.

3. *Li Y., Liang B., Gu Z.M., Zou X.Y., Cheng J.C.* Reflected Wavefront Manipulation Based on Ultrathin Planar Acoustic Metasurfaces // Scien. Rep. 2013. **3**. P. 2546.

4. *Zigoneanu L., Popa B.-I., Cummer S.A.* Three-dimensional broadband omnidirectional acoustic ground cloak // Nat. Mat. 2014. **13**, N. 4. P. 352.

5. *Li J., Chan C.T.* Double-negative acoustic metamaterial // Phys. Rev. E. 2004. **70**, N. 5. P. 055602.

6. *Буров В.А., Волошинов В.Б., Дмитриев К.В., Поликарпова Н.В.* Электромагнитные и акустические волны в метаматериалах и структурах // УФН. 2011. С. 1201–1234.

7. *Memoli G., Caleap M., Asakawa M., Sahoo D.R., Drinkwater B.W., Subramanian S.* Metamaterial bricks and quantization of meta-surfaces // Nat. Comm. 2017. **8**. P. 14608.

8. *Matlack K.H., Bauhofer A., Krödel S., Palermo A., Daraio C.* Composite 3D-printed metastructures for low-frequency and broadband vibration absorption // Proc. Nat. Acad. Scien. 2016. **113**, N 30. P. 8386-8390.

9. *Chen Y., Li T., Scarpa F., Wang L.* Lattice Metamaterials with Mechanically Tunable Poisson's Ratio for Vibration Control // Phys. Rev. App. 2017. **7**, N 2. P. 024012.

10. *Ciborowski T., Wojtczak E.J., Rucka M.* Modal analysis of a beam with a metamaterial segment produced using additive manufacturing technology // Adv. Scien. Tech. Res. J. 2025. **19**, N. 8. P. 359–372.

11. *Liu N, Becton M, Zhang L, Tang K, Wang X.* Mechanical Anisotropy of Two-dimensional Metamaterials: A Computational Study // Nanosc. Adv. 2019. **1**, N 8. P. 2891-2900.

КОНЕЧНО-РАЗМЕРНЫЕ ШУМОИЗОЛИРУЮЩИЕ МЕТАМАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ С-ОБРАЗНЫХ РЕЗОНАТОРОВ ГЕЛЬМГОЛЬЦА

Васильев Е.О., Красикова М.В.

[1)] Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, Россия

Тел.: (919) 936-03-66; E-mail: evgenii.vasilev@metalab.ifmo.ru

Акустические метаматериалы рассматриваются как перспективная альтернатива традиционным шумоизолирующим системам. Однако их практическое применение зачастую ограничено, поскольку большинство исследований проводится для бесконечно периодических структур в условиях лабораторных установок, что может не соответствовать реальным эксплуатационным сценариям. Ключевой проблемой при проектировании является учет конечных размеров структуры не только вдоль направления распространения волны, но и в ортогональных направлениях.

В настоящей работе исследуется влияние конечных размеров на шумоизолирующие свойства квази-двумерных метаструктур на примере массива парных С-образных резонаторов Гельмгольца. Показано, что связь между резонаторами вдоль оси, ортогональной направлению падающей волны, приводит к неоднородному распределению поля, нарушающему условия Флоке, применимые к бесконечно периодическим структурам. В результате спектр коэффициента пропускания конечной структуры существенно отклоняется от спектра бесконечного аналога. Установлено, что не только толщина, но и ширина структуры влияет на глубину и спектральную ширину запрещенных зон.

Численное моделирование выполнено в COMSOL Multiphysics, экспериментальная верификация проведена с использованием квази-двумерной безэховой камеры и образцов, изготовленных методом 3D-печати. Результаты демонстрируют, что для достижения проектных характеристик в реальных приложениях процедура проектирования акустических метаструктур должна учитывать их конечные размеры по всем направлениям.

Ключевые слова: акустические метаматериалы, шумоизоляция, конечные периодические структуры, резонаторы Гельмгольца, запрещенные зоны

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-79-31027

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39565

Связанные состояния в континууме в периодических акустических структурах

Халяпин А.В.[1)], Ли Юн [2)], Петров М.И.[1)] , Богданов А.А.[1,3)]

[1)]Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, Россия;

[2)]Университет Тунцзи, г. Шанхай, Китай;

[3)]Харбинский инженерный университет, г. Циндао, Китай.

Тел.: (921) 3102412; E-mail: a.bogdanov@metalab.ifmo.ru

В данной работе использована теоретико-групповая методика для анализа и предсказания симметрийно-защищённых связанных состояний в континууме в двумерных акустических метарешетках. Методика применена для полной классификации мод для квадратной решётки Браве. Симметрийный анализ мод Блоха в высокосимметричных точках зоны Бриллюэна позволил установить правила отбора, связывающие неприводимые представления точечной группы с радиационными свойствами. Показано, что моды, принадлежащие определенным представлениям, являются строго защищёнными от излучения ССК.

Ключевые слова: связанные состояния в континууме, акустический метаматериал, акустическая метаповерхность.

Введение

Связанные состояния в континууме (ССК) представляют собой фундаментальное физическое явление, обеспечивающее локализацию волны на частотах, лежащих в спектре распространяющихся мод. Концепция ССК, изначально предложенная в квантовой механике, стала универсальным инструментов описания резонансных явлений в фотонике, гидродинамике и акустики [1]. В качестве одного из механизма достижения высокой добротности в открытых волноводных системах выступает ССК [2]. Симметрийная защита выступает наиболее устойчивым механизмом формирования таких состояний в периодических структурах. Разработка теоретической базы для анализа акустических систем с симметрией D_{4h} позволяет априори предсказывать существование ССК и определять их частотные области. Поэтому основным направлением выбрана разработка теоретико-групповой методики для предсказания таких состояний.

В рамках работы решались следующие задачи: проведение теоретического анализа механизмов формирования связанного состояния в континууме в периодических структурах; разработка и реализация методов симметрийного анализа для классификации мод по неприводимым представлениям групп D_{4h} и ее малой подгруппы C_{2v}.

Полученная классификация по неприводимым представлениям групп симметрии точек зоны Бриллюэна позволяет разделить все собственные моды структуры на излучающие и симметрийно-защищённые ССК.

1 Теоретическая модель

Объектом исследования выбрана 2D-периодическая акустическая структура с симметрией

элементарной ячейки D_{4h} в 3D пространстве (рис.1). Распространение волн описывается уравнением Гельмгольца:

$$\Delta p(\mathbf{r}) + k^2 n^2(\mathbf{r}) p(\mathbf{r}) = 0$$

$p(\mathbf{r})$ – акустическое давление, k – волновое число, $n(\mathbf{r})$ – показатель преломления среды, который является по предположению периодической функцией $n(\mathbf{r}+\mathbf{\Lambda}) = n(\mathbf{r})$. Для двумерной периодической метаповерхности решение, согласно теореме Блоха, может быть выбрано в виде

$$p(\mathbf{r}) = e^{i\mathbf{kr}} u_{\mathbf{k}}(\mathbf{r}),$$

где $u_{\mathbf{k}}(\mathbf{r}+\mathbf{\Lambda}) = u_{\mathbf{k}}(\mathbf{r})$ - функция Блоха, для всех $\mathbf{\Lambda}$, принадлежащих решетке Браве.

а *б*

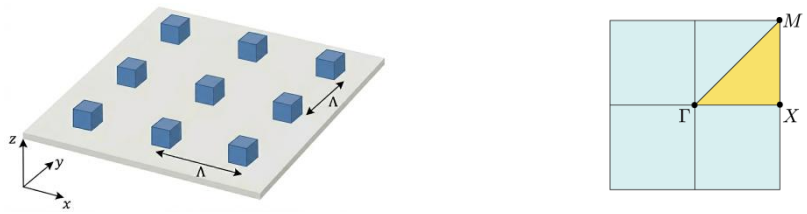


Рис. 1 Геометрия акустической метаповерхности. Показан фрагмент из 9 элементарных ячеек с периодом решетки Λ. Плоскость структуры совпадает с плоскостью xy (а). Первая зона Бриллюэна для квадратной решетки Браве (б).

2 Классификация связанных состояний в континууме

Действие $R(g)$ элемента g группы симметрии D_{4h} на функцию $p(\mathbf{r})$ определяется как $(R(g)p)(\mathbf{r}) = p(g^{-1}\mathbf{r})$. В Γ - точке группа симметрии исходная D_{4h}. Акустическое давление раскладывается по сферическим гармоникам $Y_{lm}(\theta,\varphi)$:

$$p(\mathbf{r}) = \sum_{\ell=0}^{+\infty} \sum_{m=-\ell}^{\ell} a_{lm} R_l(r) Y_{lm}(\theta,\varphi),$$

где a_{lm} - коэффициенты разложения, $R_l(r)$ - радиальная часть. Неприводимые представления группы D_{4h}

$$\hat{D}_{4h} = \{A_{1g}, A_{2g}, A_{1u}, A_{2u}, B_{1g}, B_{2g}, B_{1u}, B_{2u}, E_g, E_u\}$$

На рис. 2 представлены собственные моды периодической акустической метаповерхности с квадратной симметрией D_{4h} в Γ - точке первой зоны Бриллюэна. Структура сформирована из одинаковых резонаторных элементов, расположенных в узлах квадратной решётки, что обеспечивает симметрию D_{4h}. Каждый резонатор выполнен в виде куба из метаматериала с пониженной скоростью звука порядка 100 м/с, характерной для аэрогелей и ультралёгких пористых материалов. Все моды на рисунке изображены при нулевом волновом векторе, что означает синфазное возбуждение всех элементов структуры.

Классификация мод по неприводимым представлениям группы D_{4h} показывает:

1) представления A_{1g} и A_{2u} соответствуют радиационным модам, так как их симметрия позволяет эффективную связь с плоскими волнами в окружающей среде;
2) остальные восемь представлений определяют связанные состояния в континууме — распределение давления в этих модах приводит к полному подавлению излучения за счёт симметрийной компенсации вкладов в дальнее поле.

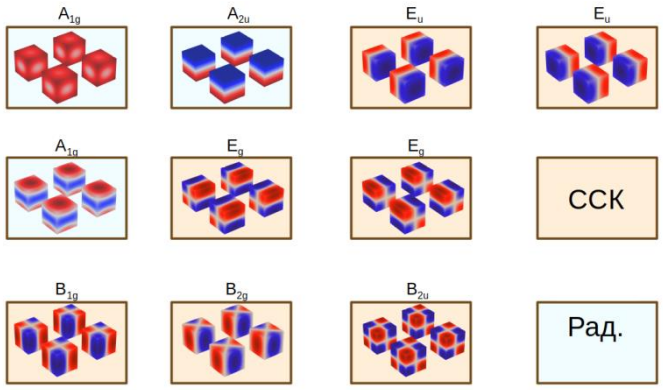


Рис. 2. Собственные моды периодической акустической метаповерхности с квадратной симметрией D_{4h} в Γ - точке первой зоны Бриллюэна. Метаповерхность состоит из кубических резонаторов, выполненных из акустического метаматериала со скоростью звука около 100 м/с, характерной для аэрогельных и ультралёгких пористых материалов. Цветовая шкала показывает распределение акустического давления (красный и синий — значения противоположного знака). Расчет собственных мод произведен в пакете COMSOL.

а

D_{4h}	E	$2C_4(z)$	C_2	$2C'_2$	$2C''_2$	i	$2S_4$	σ_h	$2\sigma_v$	$2\sigma_d$
A_{1g}	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1
A_{2g}	+1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1
B_{1g}	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	+1	+1	-1
B_{2g}	+1	-1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	+1
E_g	+2	0	-2	0	0	+2	0	-2	0	0
A_{1u}	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	-1
A_{2u}	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	-1	+1	+1
B_{1u}	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1
B_{2u}	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1
E_u	+2	0	-2	0	0	-2	0	+2	0	0

б

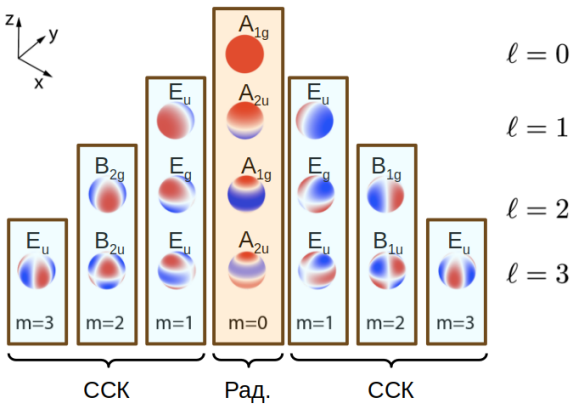


Рис. 3. Симметрийная классификация собственных мод в Γ -точке для структуры с квадратной симметрией D_{4h} показана на рисунке: на панели (а) приведена таблица характеров (для чётных (g) и нечётных (u) представлений) группы D_{4h}, : на панели (б) — разложение скалярных мод по её неприводимым представлениям для различных мультипольных порядков ℓ и магнитных индексов m, включая характерные распределения поля. Моды представлений A_{1g} и A_{2u} являются радиационными, тогда как все остальные соответствуют симметрийно защищённым связанным состояниям в континууме.

На рис. 3 показано разложение собственных мод структуры D_{4h} в Γ -точке по неприводимым представлениям и мультипольным порядкам ℓ. Это позволяет определить, какие моды излучают, а какие остаются ССК.. Такая классификация облегчает анализ связанных состояний в континууме и их симметрийно обусловленных свойств.

Более формально: излучение происходит строго вдоль оси z $(\theta = 0)$ для Γ - точки. Ненулевой вклад дают только гармоники с $m = 4k, k = 0, 1, 2, \ldots : Y_{l,4k}$. Их четность по инверсии зависит от четности ℓ: $Y_{l,4k}(\theta,\varphi) \to (-1)^{\ell} Y_{l,4k}(\theta,\varphi)$. Следовательно, подпространство излучающих гармоник: для четных ℓ неприводимое представление A_{1g}, для нечетных - A_{2u}. Поскольку все неприводимые представления $\hat{D}_{4h}$, кроме A_{1g} и A_{2u}, порождают симметрийно защищённые ССК, радиационные характеристики мод в Γ - точке полностью обусловлены их симметрией

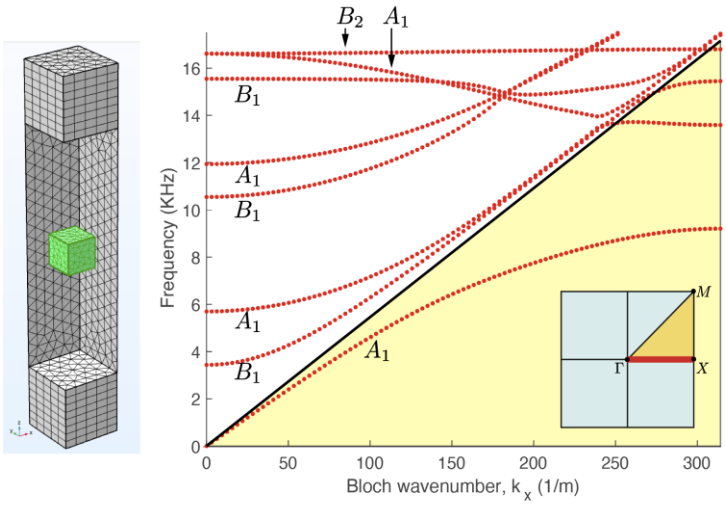


Рис. 4. Расчётная модель и дисперсия собственных акустических мод периодической структуры с периодом 1 см. Слева показана элементарная ячейка с кубическим резонатором; для моделирования открытой системы сверху и снизу использованы идеально согласованные поглощающие слои (PML), тогда как в плоскости структуры по остальным направлениям заданы блоховские граничные условия. Справа приведена дисперсия мод вдоль направления Г–X первой зоны Бриллюэна. Дисперсионные ветви помечены неприводимыми представлениями группы симметрии.

На рис. 4 представлена используемая в расчётах элементарная ячейка периодической акустической структуры и соответствующий дисперсионный спектр мод. Левая панель показывает геометрию ячейки с периодом 1 см: в центре расположен кубический резонатор (выделен зелёным цветом), играющий роль акустического метаэлемента, окружённого воздухом. Модель дискретизируется трёхмерной конечно-элементной сеткой. Для корректного описания излучения структура замыкается идеально согласованными слоями (PML) в направлении нормали, а в плоскости используется блоховская периодичность, что соответствует бесконечной решётке.

Правая панель отображает дисперсию собственных мод вдоль направления ΓX, полученную решением задачи на собственные частоты при различных значениях волнового вектора k_x вдоль оси x

в COMSOL Multiphysics. Красные точки представляют вычисленные моды, чёрная линия — дисперсию плоской волны в воздухе, выше которой расположен радиационный континуум. Каждая дисперсионная ветвь классифицирована по неприводимому представлению группы C_{2v}, определяющей симметрийные свойства мод вдоль данного направления.

Группа волнового вектора на этой линии – C_{2v}. Анализ показывает, что излучающие гармоники (с ненулевой проекцией на направление излучения) преобразуются по неприводимым A_1 и B_1 группы C_{2v}. Неприводимые представления этой группы

$$\hat{C}_{2v} = \{A_1, A_2, B_1, B_2\}.$$

Моды, принадлежащие НП A_2 и B_2 группы C_{2v}, являются симметрийно защищенными ССК.

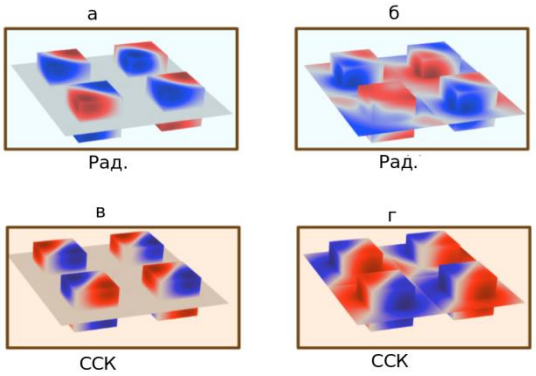


Рис. 5. Распределение акустического давления для собственных мод вдоль направления ΓM и демонстрация влияния симметрии на их радиационные свойства. Моды представлений B_1 (а) и A_1 (б) имеют ненулевые излучающие компоненты и являются радиационными. В противоположность этому, моды A_2 (в) и B_2 (г) обладают симметрией, приводящей к полной компенсации дальнего поля, и реализуются как ССК. Принадлежность моды к определённому представлению малой группы полностью определяет её радиационный характер.

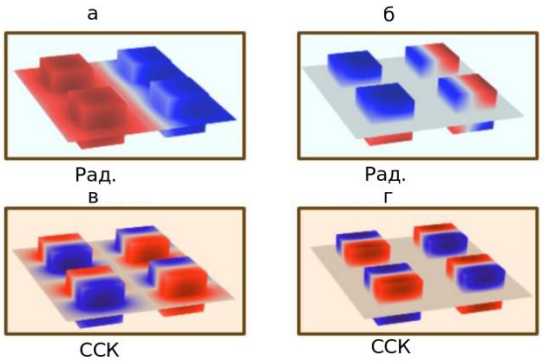


Рисунок 6. Распределение акустического давления для собственных мод вдоль направления ΓX и демонстрация влияния симметрии на их радиационные свойства. Моды представлений B_1 (а) и A_1 (б) имеют ненулевые излучающие компоненты и являются радиационными. В противоположность этому, моды B_2 (в) и A_2 (г) обладают симметрией, приводящей к полной компенсации дальнего поля, и реализуются как ССК. Принадлежность моды к определённому представлению малой группы полностью определяет её радиационный характер.

Теоретические выводы подтверждены результатами конечно-элементного моделирования в COMSOL Multiphysics для тестовой акустической метаструктуры с симметрией D_{4h}, см. рис. 2, 5 и 6.

Заключение

Разработана теоретико-групповая методология для предсказания симметрийно защищённых ССК в двумерных периодических акустических структурах. Установлена связь: радиационный или нерадиационный характер собственной моды полностью определяется её неприводимым представлением. Например, в Γ - точке моды A_{1g} и A_{2u} являются излучающими, а все остальные представления группы D_{4h} соответствуют ССК. Вдоль направления ΓM и ΓX моды представлений A_2 и B_2 группы C_{2v} являются ССК, в то время как A_1 и B_1 — радиационными. Теоретические выводы полностью подтверждены численным моделированием.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №25-79-31027.

Список литературы

1. Кошелев К Л, Садриева З Ф, Щербаков А А, Кившарь Ю С, Богданов А А "Связанные состояния непрерывного спектра в фотонных структурах" *УФН* **193** 528–553 (2023)

2. He, L., Sun, S., Abraham-Ekeroth, R.M. *et al.* Theoretical developments and experimental Insights of acoustic and elastic bound states in the continuum. *npj Acoust.* **1**, 11 (2025).

СВЯЗАННЫЕ СОСТОЯНИЯ В КОНТИНУУМЕ В АКУСТИЧЕСКОМ ВОЛНОВОДЕ

Железнова А.С.[1)], Халяпин А.В.[1)], Ий Дзивей[2)] , Панкин П.С.[1)], Ли Юн[3)], Петров М.И.[1)], Богданов А.А.[1,2)]

[1)] Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, Россия;

[2)] Харбинский инженерный университет, г. Циндао, Китай;

[3)] Университет Тунцзи, г. Шанхай, Китай;

Тел.: +7(967) 4336150; E-mail: a.zheleznova@metalab.ifmo.ru

Связанные состояния в континууме (ССК) – это локализованные моды, которые существуют в спектральной области распространяющихся волн, но не излучают энергию. В акустических волноводах подобные состояния могут возникать, когда моды помещенного в волновод резонатора погружены в континуум нескольких волноводных мод. Формирование ССК обусловлено интерференционным подавлением связи между локализованными модами резонатора и распространяющимися модами волновода и объясняется в рамках теоретико-группового анализа симметрий системы.

В этой работе рассматриваются акустические ССК в жёсткостенном волноводе с локальным резонатором и формулируются правила отбора, которые определяют возможность их существования. Установлено, что ССК возникают, когда волноводные моды и собственные моды резонатора относятся к разным неприводимым представлениям точечной группы симметрии, а резонатор расположен симметрично относительно центра волновода. Это ведет к полному подавлению радиационных потерь резонатора.

Когда симметрия системы нарушается, например, при смещении резонатора из центра волновода, ССК разрушается и превращается в квази-связанное состояние с конечной радиационной шириной. При этом появляются узкие резонансы с высокой, но конечной добротностью. Это открывает возможность создания акустических устройств с управляемой добротностью.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №25-79-31027.

Ключевые слова: связанное состояние в континууме, акустический волновод, группа симметрии, правила отбора

BOUND STATES IN THE CONTINUUM IN AN ACOUSTIC WAVEGUIDE

A.S. Zheleznova[1)], A.V. Khalyapin[1)], Yi Ziwei[2)], P.S. Pankin[1)], Yong Li[3)], M.I. Petrov[1)], A.A. Bogdanov[1,2)]

[1)] ITMO University, Saint Petersburg, Russia

[2)] Harbin Engineering University, Qingdao, China

[3)] Tongji University, Shanghai, China

Tel.: +7 (967) 433-6150; E-mail: a.zheleznova@metalab.ifmo.ru

Bound states in the continuum (BICs) are localized modes that exist within the spectral range of propagating waves but do not radiate energy. In acoustic waveguides, such states can arise when the modes of a resonator embedded in the waveguide are immersed in the continuum of several waveguide modes. The formation of BICs is caused by destructive interference suppressing the coupling between localized resonator modes and propagating waveguide modes, and can be explained within the framework of group-theoretical symmetry analysis.

In this work, acoustic BICs in a rigid-wall waveguide with a local resonator are studied, and selection rules determining their existence are formulated. It is shown that BICs occur when the waveguide modes and the eigenmodes of the resonator belong to different irreducible representations of the system’s point symmetry group, and when the resonator is positioned symmetrically with respect to the center of the waveguide. This leads to complete suppression of radiation losses.

When the system symmetry is broken, for example by shifting the resonator away from the center of the waveguide, the BIC is destroyed and transforms into a quasi-bound state with a finite radiation linewidth. In this case, narrow resonances with high but finite quality factors appear. This opens up possibilities for designing acoustic devices with tunable quality factors.

This work was supported by RSF grant №25-79-31027.

Keywords: Bound state in the continuum, acoustic waveguide, symmetry group, selection rules

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39566

МОДАЛЬНО-СЕЛЕКТИВНАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛЕЙ ТИПА ARMA

Карпов И.А.[1)]

[1)] *ИМАШ РАН, Москва;*
Тел.: +7(499) 1358070; E-mail: karpov@imash.ac.ru

Известно, что спектральная плотность мощности сигналов линейных колебательных систем, полученная с помощью параметров моделей типа ARMA, может воспроизводить основные резонансные особенности измеренных процессов и интерпретироваться в терминах модальных характеристик системы. Такой параметрический подход позволяет рассматривать динамику системы в виде набора мод, связанных с полюсами дискретной модели.

В настоящей работе данное представление используется в качестве основы для модально-селективной обработки сигналов. В отличие от традиционной полосовой фильтрации, не обеспечивающей строгого разделения вкладов отдельных мод и сопровождающейся «хвостовыми» эффектами, рассматривается возможность селективного подавления или выделения отдельных мод колебаний. Обсуждаются предпосылки, ограничения и потенциальные области применимости предлагаемого подхода при анализе акустических и вибрационных сигналов.

Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией): FFGU-2026-0001.

Ключевые слова: дискретно-временные случайные процессы, ARMA-модели, ARX-модели, идентификация параметров, измерение коэффициента потерь

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39567

НЕПРЕРЫВНЫЕ И ДИСКРЕТНО-ВРЕМЕННЫЕ МОДЕЛИ ЛИНЕЙНЫХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ И АММ

Бобровницкий Ю.И.[1)], Карпов И.А.[1)]

[1)] ИМАШ РАН, Москва;

Тел.: (499 1358070); E-mail: yuri@imash.ac.ru

В работе описаны наиболее общие дискретные и непрерывные модели линейных колебательных систем, включая АММ. Предполагается, что каждая такая система представляет собой часть некоторой значительно более обширной и сложной базовой упругой системы. В данном докладе в качестве такой базовой системы используется известная пространственно-дискретная структура конечно-элементного типа с большим числом степеней свободы N, описываемая стандартной системой N обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка

$$M\ddot{\mathbf{u}}(t)+C\dot{\mathbf{u}}(t)+K\mathbf{u}(t)=\mathbf{f}(t), \tag{1}$$

где $\mathbf{u}(t)$ и $\mathbf{f}(t)$ – это N-векторы смещений и сил, а элементы симметричной $N\times N$–матрицы $\mathrm{Z}=\mathrm{Z}^{\mathrm{T}}$ являются полиномами второй степени относительно непрерывного оператора $\mathrm{d}/\mathrm{d}t$ (производной по времени).

Сформулирована и решена следующая задача: найти уравнение, которое описывает колебания части масс общим числом $N_{\mathbf{u}}$ под действием сил, приложенных к другой или той же части масс числом $N_{\mathbf{f}}$ системы (1). Под действием заданных сил $N_{\mathbf{f}}$ колебания совершают все упруго связанные между собой массы базовой системы (1), но анализируются колебания только некоторых из них. Решение этой задачи в докладе получено для каждого из исследуемых смещений сначала в виде непрерывно-временной модели, описываемой обыкновенными дифференциальными уравнениями вида

$$\mathrm{L}u_j=\sum_{k=1}^{N_{\mathbf{f}}}\mathrm{L}_{jk}f_k,\quad j=1,2,\ldots,N_{\mathbf{u}}, \tag{2}$$

где L – дифференциальный оператор в виде полинома степени $2N$ по $\mathrm{d}/\mathrm{d}t$, L_{jk} – аналогичный дифференциальный оператор в виде полинома по $\mathrm{d}/\mathrm{d}t$ степени $2N-2$. Эти полиномы однозначно выражаются через элементы матрицы Z.

Согласно работе [1], непрерывные модели (2) аналитически выражаются также через дискретно-временные модели и соответственные конечно-разностные уравнения, а используя

так называемую частотную декомпозицию [2], число мод $2N$ в (2) может быть сколь угодно уменьшено. Кроме того, как показано в [2], укороченные таким образом дискретно-временные модели легко строятся по экспериментальным данным. В качестве примеров в докладе приведены некоторые частные случаи.

1. *Бобровницкий Ю.И., Карпов И.А.* Дискретная акустика: ARMA-моделирование временных процессов, теория // Акустический журнал. – 2023. – Т. 69. – № 6. – С. 665–684.

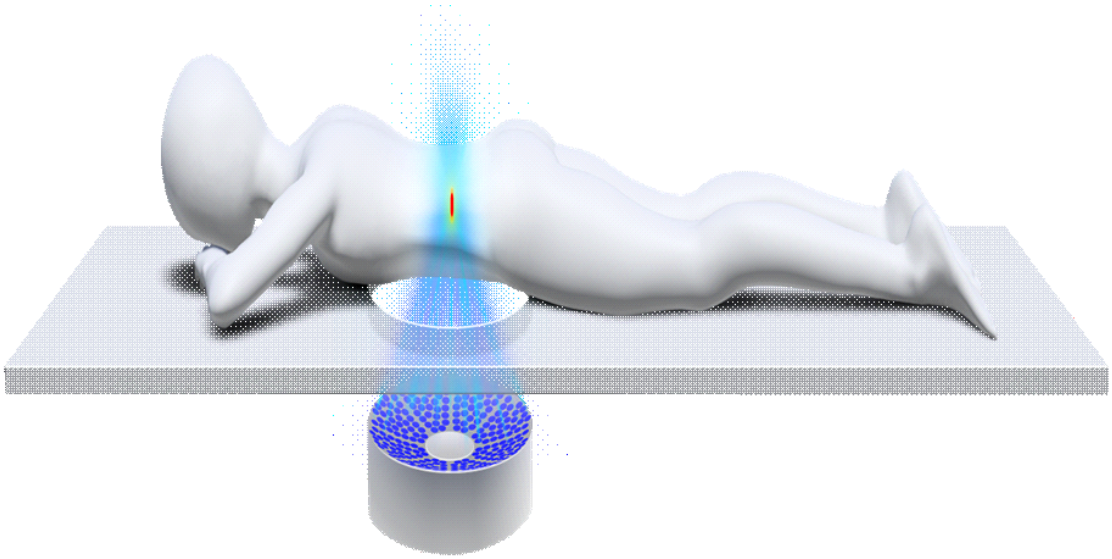
2. *Карпов И.А., Бобровницкий Ю.И.* Экспериментальный метод определения потерь энергии в колебательных системах, основанный на ARMA-моделировании // Акустический журнал. – 2025. – Т. 71. – № 2. – С. 155–175.

Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией): FFGU-2026-0001.

Ключевые слова: акусто-упругие колебательные системы, непрерывные и дискретные по времени модели, методы построения моделей

Назад к содержанию секции

МИНИ-СИМПОЗИУМ 2 МЕДИЦИНСКИЙ УЛЬТРАЗВУК: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И НОВЫЕ ЗАДАЧИ КЛИНИЧЕСКОЙ ПРАКТИКИ



назад к Содержанию

СОДЕРЖАНИЕ СЕКЦИИ МИНИ-СИМПОЗИУМ 2

МЕДИЦИНСКИЙ УЛЬТРАЗВУК: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И НОВЫЕ ЗАДАЧИ КЛИНИЧЕСКОЙ ПРАКТИКИ

1. ВОЛНОВЫЕ ЭФФЕКТЫ И ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УЛЬТРАЗВУКА В ДИАГНОСТИКЕ И ТЕРАПИИ
Сапожников О.А. 680

2. ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫЙ ФОКУСИРОВАННЫЙ УЛЬТРАЗВУК: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ И КЛИНИЧЕСКИХ ПРИЛОЖЕНИЙ
Хохлова В.А. 681

3. ФОКУСИРОВАННЫЙ УЛЬТРАЗВУК ПОД КОНТРОЛЕМ МРТ: НОВАЯ ЭРА НЕЙРОХИРУРГИИ БЕЗ РАЗРЕЗОВ
Набиуллина Д.И., Галимова Р.М., Крекотин Д.К., Ахмадеева Г.Н., Терегулова Д.Р., Сидорова Ю.А., Качемаева О.В., Юнусова Б.М., Гехтман О.В., Хамидуллина А.Р., Сафин Ш.М., Иллариошкин С.Н., Бузаев И.В. 682

4. ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ФУЗ В ФЕДЕРАЛЬНОМ ЦЕНТРЕ МОЗГА ФМБА РОССИИ
Биктимиров А.Р. 683

5. ТРАНСКРАНИАЛЬНАЯ ФУЗ-АБЛЯЦИЯ ПОД КОНТРОЛЕМ МРТ В ЛЕЧЕНИИ ЭКСТРАПИРАМИДНЫХ ЗАБОЛЕВАНИЙ В РОССИЙСКОМ ЦЕНТРЕ НЕВРОЛОГИИ И НЕЙРОНАУК
Тюрников В.М., Симонян А.С., Камадей О.О., Филатов А.С., Суслин А.С., Акинфиев В.М., Овчинников В.А., Поминова С.М., Ершова М.В., Шатохин Т.А., Федотова Е.Ю., Кротенкова М.В., Гуща А.О., Иллариошкин С.Н., Крылов В.В., Пирадов М.А.....684

6. КЛИНИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В РОССИИ ФУЗ-АБЛЯЦИИ ПОД УЛЬТРАЗВУКОВЫМ КОНТРОЛЕМ: ЛЕЧЕНИЕ ОПУХОЛЕЙ БРЮШНОЙ ПОЛОСТИ, ЗАБРЮШИННОГО ПРОСТРАНСТВА, ПОЧЕК, ОРГАНОВ МАЛОГО ТАЗА, КОСТНО-МЫШЕЧНОЙ СИСТЕМЫ, МОЛОЧНЫХ ЖЕЛЕЗ И МЯГКИХ ТКАНЕЙ
Хитрова А.Н. 685

7. ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ HIFU-ТЕРАПИИ В КЛИНИКЕ ПРЕТОР
Кочнев Д.В., Фирман А.А. 686

8. ФОКУСИРОВАННАЯ ВЫСОКОИНТЕНСИВНАЯ УЛЬТРАЗВУКОВАЯ АБЛЯЦИЯ В ОНКОЛОГИЧЕСКОЙ ПРАКТИКЕ: HIFU РАКА ПРЕДСТАТЕЛЬНОЙ ЖЕЛЕЗЫ – 15 ЛЕТ НАБЛЮДЕНИЙ
Соловов В.А., Тюрин А.А., Федулов А.А. 687

9. BLUE: ПРОТОКОЛ КРИТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ВОПРОСЫ К ФИЗИКАМ
Сафонов Д.В. 692

10. ЭЛАСТОГРАФИЯ СДВИГОВОЙ ВОЛНОЙ ОБЛАСТИ КЛИНИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ И ОЦЕНКА ВОСПРИИМЧИВОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ТКАНЕЙ К РАЗРУШЕНИЮ МЕТОДОМ ГИСТОТРИПСИИ
Кадрев А.В., Пономарчук Е.М. 693

11. ЭЛАСТОМЕТРИЯ, ОЦЕНКА ВЯЗКОСТИ И КРУТИЗНЫ ДИСПЕРСИИ В МАРШРУТИЗАЦИИ ПАЦИЕНТОВ ДО И ПОСЛЕ ТРАНСПЛАНТАЦИИ ПЕЧЕНИ (КЛИНИЧЕСКИЕ ПРИМЕРЫ)
Рыхтик П.И., Кузнецов А.И. 694

12. ОСОБЕННОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ У ПАЦИЕНТОВ С ИНСУЛЬТОМ
Головин Д.А. 695

13. ИСТОРИЯ ОТКРЫТИЯ И ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕРЦАТЕЛЬНОГО АРТЕФАКТА В УЛЬТРАЗВУКОВОЙ МЕДИЦИНСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ
Громов А.И. 696

14. ПЕРВЫЙ ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ НЕИНВАЗИВНОЙ СКАНИРУЮЩЕЙ ОПТОАКУСТИЧЕСКОЙ АНГИОГРАФИИ ПРИ ПОСТТРОМБОТИЧЕСКОЙ БОЛЕЗНИ
Немирова С.В., Субочев П.В. 697

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39568

ВОЛНОВЫЕ ЭФФЕКТЫ И ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УЛЬТРАЗВУКА В ДИАГНОСТИКЕ И ТЕРАПИИ

Сапожников О.А.

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва;

Тел.: +7(495) 939-2952; E-mail: oleg@acs366.phys.msu.ru

Ультразвуковые методы занимают одно из ведущих мест в современной медицине, обеспечивая высокоточную диагностику и эффективную неинвазивную терапию и хирургию. Диагностическое применение давно стало клиническим стандартом, а терапевтические возможности активно развиваются и внедряются в практику в последние годы. Ключевые направления терапевтического ультразвука сегодня включают, среди прочих, абляцию опухолей, дробление камней в почках и мочевыводящих путях (литотрипсию), адресную доставку лекарств, физиотерапию, а также неинвазивное лечение неврологических заболеваний мозга. Основным инструментом служит фокусированный ультразвук высокой интенсивности мегагерцового диапазона. Он глубоко проникает в мягкие ткани (до 10–15 см), при этом точность фокусировки (зона воздействия имеет миллиметровые размеры) обеспечивает локальность эффекта и безопасность окружающих тканей. Успех технологии обусловлен многолетними исследованиями в волновой физике и нелинейной акустике, биоинженерии, развитием компьютерных возможностей, а также тесным сотрудничеством физиков, биологов, инженеров и клиницистов. Ультразвуковые волны мегагерцового диапазона – коротковолновые упругие волны, которые эффективно фокусируются, отражаются, преломляются и проявляют нелинейные эффекты при высоких интенсивностях. Это позволяет дистанционно переносить энергию и импульс, вызывать термическое разрушение тканей, кавитацию, радиационную силу и модуляцию биологических барьеров. Лекция посвящена описанию физических механизмов этих эффектов и их связи с актуальными клиническими приложениями. Работа поддержана грантом РНФ № 25-12-00141.

Ключевые слова: медицинский ультразвук, ультразвуковая терапия, нелинейные акустические эффекты, фокусировка, энергия и импульс волн

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39569

ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫЙ ФОКУСИРОВАННЫЙ УЛЬТРАЗВУК: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ И КЛИНИЧЕСКИХ ПРИЛОЖЕНИЙ

Хохлова В.А.

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва;

Тел.: +7(495)939-2952; E-mail: vera@acs366.phys.msu.ru

Использование высокоинтенсивного фокусированного ультразвука в терапии и неинвазивной хирургии (HIFU – High Intensity Focused Ultrasound) в последние годы является одним из наиболее успешных практических применений физической акустики. По данным Focused Ultrasound Foundation, методы HIFU уже применяются для лечения около 40 заболеваний, а более 150 клинических показаний находятся на разных стадиях разработки. Свыше 100 компаний занимаются производством соответствующего медицинского оборудования. В 2025 году с использованием фокусированного ультразвука в мире было пролечено более 150 000 пациентов, а к концу года общее число пациентов, прошедших лечение с применением HIFU, превысило 1 000 000 человек. В докладе представлен обзор современных клинических приложений HIFU в нейрохирургии, урологии, кардиологии, гастроэнтерологии, офтальмологии и иммунологии. Приводятся примеры разработанных излучателей, рассматриваются новые подходы к метрологии HIFU-полей, особенности планирования облучения и акустической визуализации области воздействия. Обсуждаются методы компенсации аберраций при облучении абдоминальных органов и в нейрохирургических вмешательствах через интактный череп. Отмечается быстрое развитие методов механического разрушения тканей (гистотрипсии) с использованием нелинейных импульсно-периодических режимов HIFU-облучения. Помимо разрушения биотканей, указанные режимы способны вызывать дополнительные полезные биоэффекты, например, усиление выделения специфических биомаркеров и повышение иммунного отклика при онкологических заболеваниях. Работа поддержана грантом РНФ №25-12-00157.

Ключевые слова: медицинский ультразвук, ультразвуковая терапия, нелинейные акустические эффекты, фокусировка, энергия и импульс волн

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39570

ФОКУСИРОВАННЫЙ УЛЬТРАЗВУК ПОД КОНТРОЛЕМ МРТ: НОВАЯ ЭРА НЕЙРОХИРУРГИИ БЕЗ РАЗРЕЗОВ

Набиуллина Д.И., Галимова Р.М., Крекотин Д.К., Ахмадеева Г.Н., Терегулова Д.Р., Сидорова Ю.А., Качемаева О.В., Юнусова Б.М., Гехтман О.В., Хамидуллина А.Р., Сафин Ш.М., Иллариошкин С.Н., Бузаев И.В.

ООО «Клиника интеллектуальной нейрохирургии»

Международный медицинский центр им. В. С. Бузаева, г.Уфа

Тел.: +7(929)757-70-95; E-mail: Nabiullina.Dinara@yandex.ru

Возможно ли было представить 100 лет назад, что внутри головного мозга можно проводить операции без единого разреза? Нет, это казалось чистой фантастикой, но уже в 1950-х годах радиохирургия начала менять парадигму нейрохирургии, а в 1960-х врачи освоили гамма-нож, открыв путь к неинвазивному воздействию на структуры мозга. Эти инновации радикально преобразовали подход к лечению, позволив влиять на глубокие очаги патологии без инвазии, однако ключевой вызов оставался – точность. Как добиться субмиллиметровой точности внутри мозга? Может ли нейрохирург исследовать целевую зону, убедиться в полной безопасности для смежных структур и лишь тогда активировать терапию – без анестезии, без трепанации, без риска инфекции? Фокусированный ультразвук под контролем магнитно-резонансной томографии (МР-ФУЗ) стал именно той "волшебной" технологией, которая воплотила эту мечту в реальность, обеспечивая точность до 0,1 мм и революционизируя лечение двигательных расстройств.

В мае 2020 года в Уфе открылся Международный медицинский центр имени В.С. Бузаева – первый в России центр МР-ФУЗ, где под руководством доктора медицинских наук Галимовой Резиды Маратовны команда начала применять новейшую технологию. К 2026 году мы пролечили более 370 пациентов с тремором, включая случаи болезни Паркинсона, эссенциального тремора, дистонии, а также редких образований вроде гипоталамической гамартомы. Метод позволяет контролируемо нагревать целевую до 50°C для тестового воздействия: это дает временный эффект, позволяющий в реальном времени оценить клиническую отдачу и безопасность. Если зона соответствует критериям, энергия усиливается до 55°C, вызывая необратимый некроз без повреждения окружающих тканей.

Несмотря на преимущества, МР-ФУЗ не лишен вызовов: во время процедуры нарастает цитотоксический отек в зоне воздействия, когда избыточная жидкость рассеивает ультразвук, требуя прогрессивно больших энергий для достижения целевой температуры. Это усложняет длительные сессии, но опыт команды позволяет отточить скорость терапии, минимизируя отек за счет оптимизированных протоколов, что в итоге усиливает общую безопасность и предсказуемость.

Ключевые слова: фокусированный ультразвук под контролем МРТ

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39571

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ФУЗ В ФЕДЕРАЛЬНОМ ЦЕНТРЕ МОЗГА ФМБА РОССИИ

Биктимиров А.Р.

Федеральный центр мозга и нейротехнологий ФМБВ России, г.Москва

Тел.: +7(914)965-14-88; E-mail: Biartur2006@yandex.ru

Федеральный центр мозга и нейротехнологий (ФЦМН) ФМБА России активно использует технологию фокусированного ультразвука под контролем МРТ (МР-ФУЗ, система Exablate Neuro, Израиль) для лечения тремора при болезни Паркинсона и эссенциальном треморе. МР-ФУЗ позволяет проводить тепловую абляцию патологических очагов в мозге неинвазивно, обеспечивая результат непосредственно после облучения ультразвуком, минимальный риск осложнений и быструю реабилитацию. Высокая эффективность метода была продемонстрирована у 21 пациента при лечении тремора-доминантного типа болезни Паркинсона (БП). На 2-е сутки после процедуры у 52,4% пациентов тремор исчез, а у остальных снизился на 80–90%, с сопутствующим уменьшением гипокинезии и ригидности. К 12-му месяцу 76,2% пациентов сохранили значительное улучшение по тремору. Отмечалось стабильное улучшение качества жизни, повседневной активности, а также когнитивных функций у пациентов с исходно сниженными показателями МоСА. В большинстве случаев удалось стабилизировать или снизить эквивалентную суточную дозу леводопы. Нежелательные явления (атаксия, парестезии, легкий парез) были в основном транзиторными и легкими; к 12-му месяцу стойкие эффекты сохранились у 19% пациентов.

В исследовании с участием 22 пациентов с эссенциальным тремором (ЭТ) МР-ФУЗ таламотомия привела к снижению тремора по шкале CRST на 78% через 24 часа и на 63% через 12 месяцев, с сопоставимым улучшением качества жизни. Значимого негативного влияния на когнитивные функции, аффективную сферу и сон не было выявлено. Нежелательные явления (45% пациентов) также были преимущественно преходящими.

Опыт центра подтверждает, что МР-ФУЗ таламотомия является эффективным и безопасным малоинвазивным методом лечения рефрактерного тремора при БП и ЭТ, обеспечивая значительное и стойкое улучшение моторных симптомов и качества жизни.

Ключевые слова: фокусированный ультразвук под контролем МРТ

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39572

ТРАНСКРАНИАЛЬНАЯ ФУЗ-АБЛЯЦИЯ ПОД КОНТРОЛЕМ МРТ В ЛЕЧЕНИИ ЭКСТРАПИРАМИДНЫХ ЗАБОЛЕВАНИЙ В РОССИЙСКОМ ЦЕНТРЕ НЕВРОЛОГИИ И НЕЙРОНАУК

Тюрников В.М., Симонян А.С., Камадей О.О., Филатов А.С., Суслин А.С., Акинфиев В.М., Овчинников В.А., Поминова С.М., Ершова М.В., Шатохин Т.А., Федотова Е.Ю., Кротенкова М.В., Гуща А.О., Иллариошкин С.Н., Крылов В.В., Пирадов М.А.

ФГБНУ Российский центр неврологии и нейронаук, г. Москва

Тел.: +7(985) 767-13-25; E-mail: tvm5119@yandex. ru

Двигательные нарушения при заболеваниях экстрапирамидной нервной системы остаются актуальной проблемой современной неврологии и нейрохирургии. Наиболее распространенными из них являются эссенциальный тремор (ЭТ) и болезнь Паркинсона (БП). С сентября 2024 года по декабрь 2025 года в Институте Функциональной хирургии Российского центра неврологии и нейронаук было проведено 140 операций по лечению фармакорезистентного тремора у пациентов с БП и ЭТ с использованием аппарата фокусированного ультразвука ExAblate 4000 Neuro (Insightec), совмещённого с МР-томографом General Electric Signa Artist (1.5 Тесла, GE Healthcare, США).

Использовался стандартный протокол в 4 температурных режимах: Align (42-45 С), Verify (45-50 С), Treat Low (50-55 С), Treat High (55-60 С). В зависимости от требуемого эффекта и исходных параметров использовались соответствующие параметры энергии (100-1200 Дж), мощности (2000-36000 Вт) и времени (13-30 сек) воздействия. Основной мишенью деструкции являлось вентральное-промежуточное ядро таламуса (VIM). Проведенное ретроспективное исследование результатов лечения убедительно показало эффективность и безопасность метода МР ФУЗ таламотомии.

При отборе пациентов ограничивающим фактором фвляется низкое значение SDR (Skull Density Ratio — соотношение плотности черепа, характеризующее степень однородности его внутренней структуры) из-за возможности недостаточной передачи акустической энергиик фокусу. Однако, как показывают наши данные, у пациентов с показателем SDR даже меньше 0.40 можно добиться положительного эффекта ультразвукового воздействия. Поиск оптимальных мишеней и характеристик абляционного воздействия ФУЗ под контролем МРТ является залогом успешного и безопасного внедрения данной технологии в качестве метода выбора лечения пациентов с экстрапирамидными заболеваниями.

Ключевые слова: фокусированный ультразвук под контролем МРТ, болезнь Паркинсона, эссенциальный тремор

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39573

КЛИНИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В РОССИИ ФУЗ-АБЛЯЦИИ ПОД УЛЬТРАЗВУКОВЫМ КОНТРОЛЕМ: ЛЕЧЕНИЕ ОПУХОЛЕЙ БРЮШНОЙ ПОЛОСТИ, ЗАБРЮШИННОГО ПРОСТРАНСТВА, ПОЧЕК, ОРГАНОВ МАЛОГО ТАЗА, КОСТНО-МЫШЕЧНОЙ СИСТЕМЫ, МОЛОЧНЫХ ЖЕЛЕЗ И МЯГКИХ ТКАНЕЙ

Хитрова А.Н.

Клиника молекулярной коррекции, Россия Москва,

МНИОИ им. П.А. Герцена, Россия, Москва

МЦ Банка России, Москва

Тел.: +7(916)390-82-27; e-mail: dr.echo83@mail.ru

В настоящее время развитие хирургии несомненно идет по пути внедрения менее травматичных, малоинвазивных методов лечения. Метод ФУЗ (или HIFU) является единственным полностью неинвазивным методом локальной термической абляции. Аппараты для ультразвуковой абляции под ультразвуковым контролем опухолей брюшной полости, забрюшинного пространства, костно-мышечной системы, органов малого таза, молочных желез и мягких тканей в России появились в 2010 году. В докладе приводятся основные технологические особенности аппаратов JC and JC B (Chongqing HAIFU Tech. Co; КНР) и HIFU-2001 (Shenzhen Huikang Medical Apparatus Co., Ltd; КНР) с точки зрения медицинской эффективности и безопасности лечения.

Представлен клинический опыт автора в лечении опухолей различной локализации, а также аденомиоза. Обсуждаются показания и противопоказания к абляции, медицинские приемы и технологии абляции для достижения максимальной эффективности и безопасности лечения. Разбираются основные осложнения ультразвуковой абляции. На примере лечения злокачественных новообразований поджелудочной железы (как опухолей с наименьшей выживаемостью) показана высокая эффективность и безопасность лечения HIFU. Приводятся результаты 4-х летних наблюдений пролеченных больных (38 пациентов) с построением кривых выживаемости по стадиям рака поджелудочной железы.

Наибольший мировой опыт применения термического HIFU накоплен в лечении миомы матки и аденомиоза. Автором пролечено 380 пациенток с миомой и 21 пациентка с узловым аденомиозом. В докладе представлены результаты лечения в виде процента абляции, редукции узлов, повышения качества жизни, увеличения репродуктивных возможностей женщины (рождения детей после абляции миомы).

Ключевые слова: ультразвуковая абляция, ФУЗ (фокусированный ультразвук), HIFU (высокоинтенсивный фокусированный ультразвук), термическая абляция

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39574

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ HIFU-ТЕРАПИИ В КЛИНИКЕ ПРЕТОР.

Кочнев Д.В., Фирман А.А.

Клиника Претор, г.Новосибирск

lawer.trg@mail.ru

Неинвазивные методы лечения – это логическая эволюция от малоинвазивных. Одним из таких неинвазивных методов и является HIFU-терапия. Методы HIFU стремительно развиваются в последнее десятилетие, ежегодно проводятся различные симпозиумы и конгрессы по всему миру, на которых для HIFU-терапии находят новые точки применения.

В своем докладе мы хотим рассказать о нашем опыте применения HIFU-терапии при различных заболеваниях. Накопленный нами с 2022 года опыт позволяет делать выводы о плюсах и минусах методики при использовании на злокачественных и доброкачественных образованиях. Также расскажем об ограничениях и вызовах, с которыми мы столкнулись в своей практике.

Ключевые слова: неинвазивные методы лечения, HIFU-терапия, HIFU

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39575

ФОКУСИРОВАННАЯ ВЫСОКОИНТЕНСИВНАЯ УЛЬТРАЗВУКОВАЯ АБЛЯЦИЯ В ОНКОЛОГИЧЕСКОЙ ПРАКТИКЕ: HIFU РАКА ПРЕДСТАТЕЛЬНОЙ ЖЕЛЕЗЫ – 15 ЛЕТ НАБЛЮДЕНИЙ

Соловов В.А., Тюрин А.А., Федулов А.А.

ГБУЗ "Самарский областной клинический онкологический диспансер", Самара;

Тел.: +7(905)301-02-16; E-mail: samasdc@yahoo.com

Высокоинтенсивная фокусированная ультразвуковая абляция (HIFU) за последние два десятилетия стремительно внедряется в онкологическую практику. В мире проводятся многочисленные клинические испытания для оценки эффективности и безопасности ультразвуковой абляции при лечении рака печени, поджелудочной железы, молочных желез, щитовидной железы, почек, предстательной железы, костей, мягких тканей, головного мозга, сарком. По всему миру HIFU терапию проводят более чем в 1500 медицинских центрах. Только за 2025 год было пролечено более 450 тысяч пациентов.

HIFU при лечении рака предстательной железы (РПЖ), благодаря своему ключевому преимуществу неинвазивности, стала действительной альтернативой «радикальным» способам лечения. Однако продолжаются споры относительно эквивалентности метода по сравнению с оперативным вмешательством. Нами проведен сравнительный ретроспективный анализ результатов лечения 170 пациентов, получившим HIFU-терапию и 148 пациентов, которым была выполнена РПЭ в период с 2008 по 2010 гг. в Самарском клиническом онкологическом диспансере. Средняя продолжительность наблюдения за пациентами после РПЭ и HIFU составила 14,8 и 15,5 лет соответственно. 15-летние показатели общей, канцер-специфической и безрецидивной выживаемости составили 47,8% / 74,9% / 71,4% в группе HIFU и 28,0% / 64,2% / 59,4% в группе РПЭ. HIFU-терапия может рассматриваться в качестве альтернативного метода лечения рака предстательной железы у пациентов с низким и промежуточным риском прогрессии. Для пациентов с высоким риском важно учитывать возможность повторных сеансов HIFU и/или дополнительного адъювантного лечения. При длительном наблюдении HIFU демонстрирует онкологические результаты, сопоставимые с РПЭ, что делает его перспективным направлением в лечении данной патологии.

Ключевые слова: рак простаты, HIFU, радикальная простатэктомия

Введение

Рак предстательной железы (РПЖ) является наиболее частым злокачественным заболеванием солидных органов и второй причиной смертности от рака среди мужчин во всем мире [1].

В последнее время динамически развиваются малоинвазивные способы лечения рака предстательной железы, такие как высокоинтенсивная фокусированная ультразвуковая абляция (HIFU), криоабляция. HIFU, благодаря своему ключевому преимуществу неинвазивности, стала действительной альтернативой «радикальным» способам лечения, однако продолжаются споры относительно эквивалентности метода по сравнению с оперативным вмешательством [2]. В связи с этим представляется весьма актуальным изучение клинического значения HIFU терапии при лечении РПЖ при длительном наблюдении.

Цель исследования: сравнить онкологическую эффективность высокоинтенсивной фокусированной ультразвуковой абляции HIFU и радикальной простатэктомии при лечении пациентов с РПЖ при долгосрочном наблюдении

Материалы и методы

Был проведен сравнительный ретроспективный анализ результатов лечения 170 пациентов, получившим HIFU-терапию и 148 пациентов, которым была выполнена радикальная простатэктомия (РПЭ) в период с 2008 по 2010 гг на базе Государственного Бюджетного Учреждения Здравоохранения «Самарский областной клинический онкологический диспансер». Критериями включения являлись: верифицированный рак предстательной железы cT1N0M0-cT3N0M0. Критериями исключения: метастатический РПЖ, обширные оперативные вмешательства на прямой кишке в анамнезе.

Результаты

Максимальные сроки наблюдения составили до 15 лет для всех групп пациентов.

В группе HIFU-абляции и РПЭ средний возраст пациентов 67,7 и 68,5 лет соответственно. По таким показателям как ПСА до лечения, сумма Глисона, стадия Т и группа риска по классификации Европейской ассоциации урологов (EAU) пациенты были статистически сопоставимы (таблица 1) ($p>0,05$).

В группе HIFU-терапии во всех случаях использовалась спинальная анестезия. Среднее время лечения составило 150 мин (64-220). Средняя продолжительность госпитализации — 6 дней. Уретральный катетер удалялся в среднем на 5 сутки.

В группе РПЭ во всех случаях применялся эндотрахеальный наркоз. Среднее время операции составило 194 мин (85-248). Средняя продолжительность госпитализации — 14 дней. Уретральный катетер удалялся в среднем на 12 сутки.

Таблица 1. Характеристики пациентов с РПЖ в зависимости от вида лечения

Показатель	HIFU (основная группа), n=170	РПЭ (контрольная группа, n=148	Всего n=318	P
ПСА до лечения, нг/мл				
<10	90 (52,9%)	67 (45,3%)	157 (49,4%)	0,789
10 – 20	62 (36,5%)	51 (34,4%)	113 (35,5%)	0,540
≥20	18 (10,6%)	30 (20,3%)	48 (15,1%)	0,878
Сумма Глисон				
≤6	124 (72,9%)	120 (81,1%)	244 (76,7%)	0,409
7	28 (16,5%)	19 (12,8%)	47 (14,8%)	0,338
≥8	18 (10,6%)	9 (6,1%)	27 (8,5%)	0,402
Стадия Т				
Т1	37 (21,8%)	49 (33,1%)	86 (27,0%)	0,102
Т2	73 (42,9%)	62 (41,9%)	135 (42,5%)	0,165
Т3	60 (35,3%)	37 (25,0%)	97 (30,5%)	0,162
Группа риска				
Низкий	47 (27,7%)	47 (31,7%)	94 (29,6%)	0,370
Промежуточный благоприятный	39 (22,9%)	35 (23,7%)	74 (23,3%)	0,494
Промежуточный неблагоприятный	23 (13,5%)	20 (13,5%)	43 (13,5%)	0,510
Высокий	61 (35,9%)	46 (31,1%)	107 (33,6%)	0,425

В таблице 2 представлены данные общей, безрецидивной и канцероспецифичной выживаемости. При сравнении данных показателей в группах HIFU и РПЭ выявлены статистически значимые различия ($p < 0,05$).

Таблица 2. Онкологическая эффективность лечения пациентов с РПЖ при 15 летнем наблюдении

	Общая выживаемость	Безрецидивная выживаемость	Канцероспецифическая выживаемость (РПЖ)
HIFU	47,9	71,9	74,8
Радикальная простатэктомия	28,0	59,3	64,0
P	0,029	0,011	0,018

В многофакторном регрессионном анализе Кокса (таблица 3) HIFU-терапия оказалась независимым значимым прогностическим фактором снижения общей, безрецидивной и канцероспецифической смертности по сравнению с РПЭ. Высокий балл Глисона и уровень ПСА были значимыми предикторами более высокой канцероспецифической смертности в группе HIFU. В группе пациентов с промежуточным и высоким риском прогрессии HIFU терапия значимо влияла на увеличение общей выживаемости по сравнению с РПЭ. У пациентов с низким риском прогрессии статистически значимых отличий выявлено не было.

Таблица 3. Многофакторный регрессионный анализ Кокса: общая смертность, канцероспецифицеская смертность, биохимический рецидив

Прогностический фактор	Общая смертность ОР (95% ДИ), p	Канцерспецифичная смертность ОР (95% ДИ), p	Биохимический рецидив ОР (95% ДИ), p
РПЭ (по сравнению с HIFU)	2,07 (1,32; 3,29), 0,029	3,99 (1,31, 12,07) 0,011	1,41 (0,96, 2,03) 0,018
Уровень ПСА	0,99 (0,97, 1,01) 0,361	1,01 (0,97, 1,03) 0,832	1,01 (1,00, 1,01) 0,191
Показатель Глисона	1,06 (0,91, 1,22) 0,487	1,13 (0,82, 1,53) 0,487	1,14 (0,99, 1,29) 0,061
Риск прогрессии по классификации EAU			
Низкий риск	1,56 (0,71, 1,54) 0,785	1,41 (0,64, 3,28) 0,411	0,98 (0,68, 1,35) 0,792
Промежуточный благоприятный риск	1,15 (0,75, 1,59), 0,539	5,09 (1,20, 31,85) 0,019	1,01 (0,69, 1,40) 0,689
Промежуточный неблагоприятный риск	1,08 (0,68, 1,61) 0,762	7,39 (1,63, 32,98) 0,008	1,04 (0,70, 1,58) 0,928
Высокий риск	1,70 (0,80, 3,52) 0,169	6,06 (0,91, 41,12) 0,071	1,71 (0,95, 2,89) 0,054

Обсуждение

Наше ретроспективное исследование продемонстрировало, что отдаленные онкологические исходы (общая, безрецидивная и канцероспецифичная выживаемости) после HIFU-терапии сопоставимы с таковыми после радикальной простатэктомии у отобранных пациентов с локализованным раком простаты. Полученные результаты согласуются с

данными литературы. В опубликованном систематическом обзоре и мета-анализе Rischmann и соавт. было показано, что HIFU терапия имеет сопоставимые показатели биохимической безрецидивной, раково-специфической, общей выживаемости (58 %, 96 %, 63 %) по сравнению с традиционными методами при лечении локализованного РПЖ через 10 лет наблюдения. При этом HIFU характеризуется благоприятным профилем безопасности и имеет минимальное количество осложнений [3].

Выводы

HIFU-терапия может рассматриваться в качестве альтернативного метода лечения рака предстательной железы у пациентов с низким и промежуточным риском прогрессии. Для пациентов с высоким риском важно учитывать возможность повторных сеансов HIFU и/или дополнительного адъювантного лечения. При длительном наблюдении HIFU демонстрирует онкологические результаты, сопоставимые с РПЭ, что делает его перспективным направлением в лечении данной патологии.

Список литературы

1. Bray F, Laversanne M, Sung H, Ferlay J, Siegel RL, Soerjomataram I, Jemal A. Global cancer statistics 2022: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries. CA Cancer J Clin. 2024 May-Jun;74(3):229-263. doi: 10.3322/caac.21834. Epub 2024 Apr 4. PMID: 38572751.

2. Yang, C.-H.; Barbulescu, D.-V.; Marian, L.; Tung, M.-C.; Ou, Y.-C.; Wu, C.-H. High-Intensity Focus Ultrasound Ablation in Prostate Cancer: A Systematic Review. *J. Pers. Med.* 2024, *14*, 1163. *https://doi.org/10.3390/jpm1412116*

3. Rischmann PJ, Coloby P, Chevallier T, Houede N, Villers A, Ploussard G. P2-06 HIFI TRIAL: HIFU VS RADICAL PROSTATECTOMY FOR LOCALIZED PROSTATE CANCER IN 3328 CASES. FINAL RESULTS. Journal of Urology [Internet]. 2024 May 1;211(5S2):e4. https://doi.org/10.1097/01.JU.0001015816.87470.c9.06

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39576

BLUE-ПРОТОКОЛ: КРИТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ВОПРОСЫ К ФИЗИКАМ

Сафонов Д.В.

ФГБОУ ВО «Приволжский исследовательский медицинский университет»

Минздрава России, Нижний Новгород;

Тел.: +7(910)795-5925; E-mail: safonovdv@inbox.ru

BLUE-протокол, опубликованный еще в 2008 году, нашел определенное практическое применение в диагностике заболеваний легких в период пандемии COVID-19 благодаря достаточно простому освоению и быстрому выполнению непосредственно у постели пациента. Суть его заключается в оценке состояния легочной ткани по предложенным авторами эхографическим паттернам, названным «профилями», при ультразвуковом сканировании легкого из нескольких точек на грудной стенке с последующим определением по этим изображениям причины развития острой дыхательной недостаточности. Однако неоднозначная и путаная терминология авторов при обозначении конкретных ультразвуковых объектов в контексте их анатомической основы, а также противоречивое физическое обоснование ряда акустических феноменов, вызывает много вопросов и критических замечаний. Нами предложено иное физическое обоснование элементов ультразвукового изображения нормального и патологически измененного легкого и плевры, доказательное на основе их анатомического и гистологического строения, разрешающей способности сканера и законов акустики. В первую очередь, это относится к интерпретации ультразвуковой картины поверхности неизмененной воздушной легочной ткани (понятие «плевральная линия»), трактовке морфологической основы так называемых В-линий как элемента нормальной эхокартины легкого и признака его интерстициального отека и дифференциально-диагностическим критериям и их эхографическому воплощению в алгоритме определения причины дыхательной недостаточности. В процессе критического анализа BLUE-протокола, основанного на собственном многолетнем опыте ультразвуковой диагностики патологии легких и плевры, у нас возникли вопросы по физическим аспектам формирования изображения, требующие консультации и обсуждения с ведущими специалистами в области медицинского ультразвука.

Ключевые слова: ультразвуковая диагностика легких, BLUE-протокол, артефакты хвоста кометы, В-линии, плевральная линия, интерстициальные изменения легких

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39577

ЭЛАСТОГРАФИЯ СДВИГОВОЙ ВОЛНОЙ: ОБЛАСТИ КЛИНИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ И ОЦЕНКА ВОСПРИИМЧИВОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ТКАНЕЙ К РАЗРУШЕНИЮ МЕТОДОМ ГИСТОТРИПСИИ

Кадрев А.В. [1,2], Пономарчук Е.М. [3]

[1] МГУ имени М.В. Ломоносова, Медицинский научно-образовательный институт, г. Москва

[2]Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования, г. Москва

[3] МГУ имени М.В. Ломоносова, физический факультет, г. Москва;

Тел.: (495) 531-27-83; E-mail: akadrev@yandex.ru

Эластография сдвиговой волной (ЭСВ) – ультразвуковой метод количественной оценки жесткости (модуля Юнга) биологических тканей. Он используется в клинической практике для оценки выраженности фиброза при диффузных заболеваниях печени и во многих случаях стал альтернативой биопсии. Метод полезен и в дифференциальной диагностике очаговых образований молочной и щитовидной желез, мягких тканей, патологии лимфатических узлов, помогает определить показания к биопсии, а также в некоторых случаях уточнить границы опухоли. При наличии участков повышенной жесткости в предстательной железе метод помогает в проведении прицельной биопсии, повышая выявляемость рака. В докладе приводятся данные собственного клинического опыта применения ЭСВ при таких опухолях.

Новым направлением ЭСВ является его применение в ранней диагностике фиброза и мониторинге хронической болезни почек. ЭСВ позволяет определить патологические изменения, которые не видны при рутинном УЗИ. В докладе излагаются собственные примеры использования метода у таких пациентов.

В последние годы метод ЭСВ-измерения жесткости различных тканей используется в качестве основной метрики для оценки восприимчивости тканей различных органов к бесконтактному механическому разрушению методом гистотрипсии. В докладе приводятся и обсуждаются данные проведенных в МГУ экспериментов *ex vivo* по измерению упругих свойств тканей и опухолей с высокой жесткостью (предстательной железы и миомы матки) и низкой жесткостью (печени, различных разделов почек и крупных организованных гематом) и их последующего разрушения методом гистотрипсии с кипением.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №25-12-00157.

Ключевые слова: эластография сдвиговой волной, гистотрипсия, фиброз печени, дифференциальная диагностика, опухоли

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39578

ЭЛАСТОМЕТРИЯ, ОЦЕНКА ВЯЗКОСТИ И КРУТИЗНЫ ДИСПЕРСИИ В МАРШРУТИЗАЦИИ ПАЦИЕНТОВ ДО И ПОСЛЕ ТРАНСПЛАНТАЦИИ ПЕЧЕНИ (КЛИНИЧЕСКИЕ ПРИМЕРЫ)

Рыхтик П.И. [1) 2)], **Кузнецов А.И.** [2)]

[1)] ФБУЗ «Приволжский окружной медицинский центр ФМБА России», Нижний Новгород;

[2)] ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород;

Тел.: +7(910)791-2616; E-mail: rykhtik@gmail.com

Мультипараметрическое ультразвуковое исследование с применением новых возможностей в диагностике значительно расширяет возможности в оценке паренхимы печени и меняет маршрутизацию больных. Эластометрия (2 D SWE) печени и селезенки давно диагностируются в гепатологии и заняли свое место в клинических рекомендациях по лечению НАЖБП, цирроза печени, и пациентов с разными формами гепатитов. Относительно новые здесь методики - оценка вязкости (коэффициент поглощения ультразвука ATI) и крутизна дисперсии скорости сдвиговых волн (SWDS) делают первые шаги в практическом примени и ищут свои ниши в алгоритме диагностического процесс.

В нашей практике эластометрия (2DSWE) с определением жесткости в кПа, входит в стандарт мониторинга пациентов в листе ожидания пересадки печени, для оценки в динамике степени фиброза по шкале Метавир и определения динамики портальной гипертензии. Так же, данная методика, мультипараметрического УЗИ включена в маршрутизацию оценки «качества» паренхимы трансплантата печени. В ходе мониторинга данных пациентов в клинически неясных случаях, нами проводилось углубленное исследование с определением ATI (дБ\см МГц) и SWDS (м\с кГц).

В ходе клинико-диагностического поиска нами, в ряде случаев выявлены значимые показатели вязкости и крутизны дисперсии сдвиговых волн, которые изменили маршрутизацию пациентов. В ходе практической работы с новыми ультразвуковыми методиками, мы считаем необходимым совместная работа со специалистами физиками, которые подсказывают физические аспекты методов, что позволяет направить практическую работы на максимальный клинический ответ.

Ключевые слова: эластометрия сдвиговой волной, вязкость, крутизна дисперсии скорости сдвиговой волны

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39579

ОСОБЕННОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ У ПАЦИЕНТОВ С ИНСУЛЬТОМ

Головин Д.А.

Федеральный центр мозга и нейротехнологий ФМБВ России, Москва;

Тел.: +7(495)280-35-50; E-mail: golovin@fccps.ru

Ультразвуковые методы диагностики широко применяются в современной клинике ангионеврологии. Среди сосудистых заболеваний центральной нервной системы ишемический инсульт является наиболее тяжелым как с медицинской, так и с социально-экономической точек зрения. Ультразвуковые исследования, наряду с КТ и МРТ, входят в актуальные клинические рекомендации по лечению, диагностике и профилактике ишемического инсульта, их проведение является обязательным.

Ультразвуковые исследования (УЗИ) головного мозга, его сосудистой и ликворных систем, как правило, проводятся через неповрежденные кости височной области черепа и сопряжены с фундаментальными ограничениями, связанными с сильным затуханием и искажениями волнового фронта ультразвуковых волн диагностических частот в неоднородных по толщине и структуре костях черепа. Используемый в настоящее время диапазон частот (1-5 МГц) и допустимая мощность не позволяют обеспечить высокое пространственное разрешение при визуализации интракраниальных структур. Доступные исследованию анатомические области ограничены лишь основанием мозга – мезенцефальными структурами, артериями и венами, расположенными на этому уровне в аксиальной плоскости. С другой стороны, существуют и уникальные ультразвуковые методы, безальтернативные рентгенологическим методам, например – микроэмболодетекция. Тем не менее очевидно, что использование существующих технологий генерации и приема ультразвуковых сигналов неспособно решить проблему визуализации внутричерепных структур и необходимы дальнейшие исследования.

Ключевые слова: ультразвуковая диагностика головного мозга, ишемический инсульт, интракраниальные структуры и сосуды

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39580

ИСТОРИЯ ОТКРЫТИЯ И ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АРТЕФАКТА МЕРЦАНИЯ В УЛЬТРАЗВУКОВОЙ МЕДИЦИНСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ

Громов А.И.

НИИ урологии и интервенционной радиологии им. Н.А. Лопаткина – филиал «НМИЦ радиологии» Минздрава России

Тел.: +7(499)110-40-67 E-mail: call@niiuro.ru

Артефакт мерцания (АМ) представляет собой зону быстрой беспорядочной смены цветов на ультразвуковом изображении в доплеровском режиме. Первое сообщение о нем было сделано в 1996 г. A. Rahmouni и соавт. Интерес к данному явлению, имеющему диагностическое значения для обнаружение конкрементов, в течение 30 лет менялся. В 2000 годах он уменьшился, что, очевидно, было связано с внедрением в аппараты того поколения программных систем подавления артефактов.

В НИИ урологии им. Н.А. Лопаткина проводится программа изучения АМ для повышения эффективности диагностики мочевых камней. Разработана методика определения возможности получения АМ на конкретных ультразвуковых сканерах и протестированы 14 аппаратов. Для этого была создана установка, состоящая из емкости с фиксирующим устройством для погружения датчика в жидкую среду и расположенными на дне фиксированными мочевыми камнями. В двух аппаратах производства 2011 года АМ был выражен слабо, остальные современные аппараты позволили его зарегистрировать. Разработанная методика помогла определить наиболее значимые настройки аппарата, влияющие на визуализацию АМ: мощность, опорная частота цветового доплера, приоритет тканей, PRF и межкадровое усреднение. При исследовании, посвященном выявлению АМ у 49 больных нефролитиазом чувствительность составила 97%, специфичность 100%.

Тем не менее, проблемой использования АМ на практике остается существование других артефактов цветового доплера, имеющих вид схожий с АМ, в частности «артефакт вспышки», возникающий за скоплениями газа, что может усложнять выявление АМ. Нужны дополнительные исследования в данном направлении.

Ключевые слова: ультразвуковая визуализация, мочекаменная болезнь, эффект мерцания

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39581

Первый опыт применения неинвазивной сканирующей оптоакустической ангиографии при посттромботической болезни

Немирова С.В.[1,2], Субочев П.В.[2]

[1]ФГБОУ ВО «Приволжский исследовательский медицинский университет» Минздрава России, Нижний Новгород; [2]Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород

E-mail: pavel.subochev@gmail.com

С ростом частоты встречаемости посттромботической болезни (ПТБ) и ассоциированных с ней трофических нарушений агрессивного течения, ригидных к терапии и склонных к рецидивированию у ряда пациентов отмечается несоответствие положительной ультразвуковой динамики клиническим проявлениям заболевания, в т.ч. визуально определяемым трофическим нарушениям тканей в области типичной локализации венозных язв. Это актуализирует исследование дистальных венозных сплетений конечности, визуализируемых с помощью неинвазивной сканирующей оптоакустической ангиографии (ОА-АГ), дополняющей классическое триплексное ангиосканирование вен нижних конечностей. При исследовании in vivo использовали растровый ОА-мезоскоп с импульсным лазером 532 нм (≈1 нс, 2 кГц), волоконной подачей излучения (Ø 400 мкм) и сферически фокусированным широкополосным ПВДФ-детектором 1-50 МГц, обеспечивающим латеральное разрешение <50 мкм и глубину визуализации около 2 мм. Количественно оценивали долю объёма кровенаполненных структур, диаметр и извитость сосудов при 3 положениях позиционной пробы. При ПТБ выявлялись признаки периферической флебогипертензии, в т.ч. увеличение кровенаполнения, дилатация и выраженная извитость вен, а также отсутствие пространственного разделения сплетений как диагностически значимый признак. Позиционные пробы у пациентов с ПТС демонстрировали значимое отличие от нормы. ОА-АГ может рассматриваться как дополнительный неинвазивный метод объективизации изменений дистальных сосудистых сплетений при ПТБ, оценки риска трофических нарушений и, потенциально, мониторинга эффективности терапии.

Благодарности: разработка оптоакустической системы, клинические исследования и обработка данных выполнены при поддержке РНФ (проект № 19-75-10055).

Ключевые слова: посттромботический синдром, периферическая флебогипертензия, позиционные пробы, дистальные венозные сплетения, неинвазивная сканирующая оптоакустическая ангиография.

First experience with noninvasive scanning optoacoustic angiography in post-thrombotic disease

Nemirova S.V.[1,2], Subochev P.V.[2]

[1] Privolzhsky Research Medical University, Ministry of Health of Russia, Nizhny Novgorod;

[2]A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod

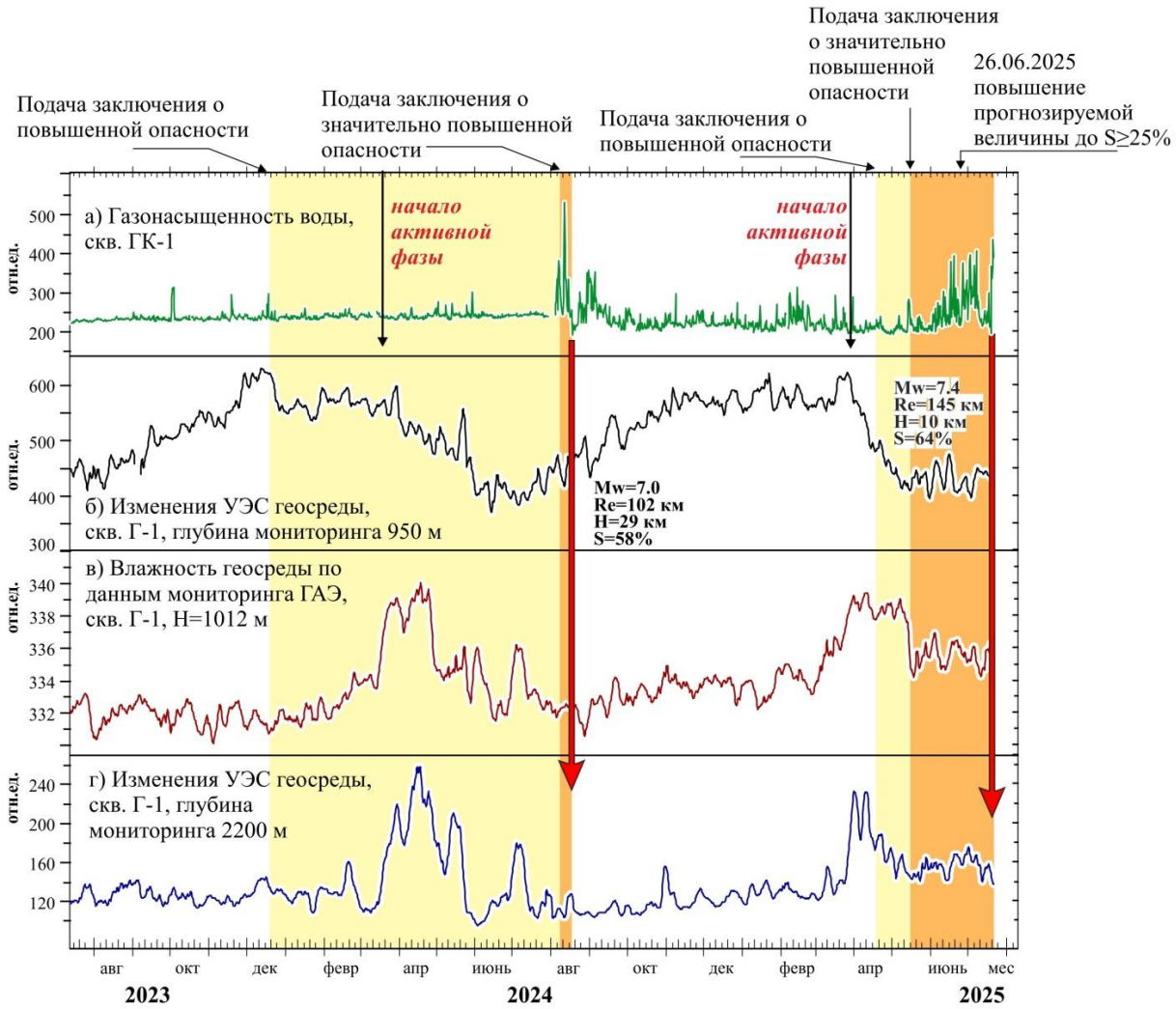
E-mail: pavel.subochev@gmail.com

With the increasing incidence of post-thrombotic disease (PTD) and associated trophic disorders characterized by an aggressive course, resistance to therapy, and a tendency to recur, a number of patients demonstrate a discrepancy between positive ultrasound dynamics and the clinical manifestations of the disease, including visually detectable trophic tissue changes in areas typical of venous ulcer localization. This underscores the relevance of studying the distal venous plexuses of the limb, which can be visualized using noninvasive scanning optoacoustic angiography (OA-AG), complementing conventional triplex ultrasound scanning of the veins of the lower extremities. In the in vivo study, a raster-scan optoacoustic mesoscope with a 532 nm pulsed laser (~1 ns, 2 kHz), fiber delivery of the radiation (~400 um), and a spherically focused broadband PVDF detector operating in the 1-50 MHz range was used, providing lateral resolution below 50 um and an imaging depth of about 2 mm. The fraction of the volume occupied by blood-filled structures, as well as vessel diameter and tortuosity, was quantified in three positional test conditions. In PTD, signs of peripheral phlebohypertension were revealed, including increased blood filling, venous dilatation, marked tortuosity, and the absence of spatial separation between venous plexuses as a diagnostically significant feature. Positional tests in patients with post-thrombotic syndrome demonstrated significant differences from normal findings. OA-AG may be considered as an additional noninvasive method for objective assessment of changes in distal vascular plexuses in PTD, evaluation of the risk of trophic disorders, and, potentially, monitoring of therapy effectiveness.

Keywords: post-thrombotic syndrome, peripheral phlebohypertension, positional tests, distal venous plexuses, noninvasive scanning optoacoustic angiography.

Назад к содержанию секции

СЕКЦИЯ ГЕОАКУСТИКА



назад к Содержанию

СОДЕРЖАНИЕ СЕКЦИИ ГЕОАКУСТИКА

1.РОЛЬ СКВАЖИННЫХ ГЕОАКУСТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ В СИСТЕМЕ ПРОГНОЗА СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ
Гаврилов В.А., Бусс Ю.Ю., Морозова Ю.В., Полтавцева Е.В. 702

2. РЕЛАКСАЦИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГОРНЫХ ПОРОД ПОСЛЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ
Лебедев А.В., Островский Л.А. 708

3. НОВЫЙ МЕТОД АКТИВНОГО ВИБРОСЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
Григорюк А.П., Собисевич А.Л., Ковалевстский В.В., Брагинская Л.П. 712

4. СРАВНЕНИЕ РЕАЛИЗАЦИЙ АЛГОРИТМА РАСЧЕТА АМПЛИТУДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ
Жарков Д.А. 718

5. ВЛИЯНИЕ НЕОДНОРОДНОЙ ВОДОНАСЫЩЕННОСТИ НА ПОВЕРХНОСТНЫЕ ВОЛНЫ В ПОРИСТО-УПРУГОМ ГРУНТЕ
Фоменко С.И., Ромашин А.К. 719

6. ИСПЫТАНИЯ МАКЕТА ПРИЕМНО-ИЗЛУЧАЮЩЕГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ НИЗКОЧАСТОТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДНА В УСЛОВИЯХ РЕЧНОГО ВОДОХРАНИЛИЩА
Хилько А.И., Калинина В.И., Лисин А.А., Антонов А.А., Капустин И.А., Лебедев А.В. 720

7. ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЁТ ТРЁХМЕРНОЙ МОРСКОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ С ЛЕДОВОЙ ПЛАТФОРМЫ И В БЕЗЛЁДНЫЙ ПЕРИОД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ
Гусева Е.К., Шевченко А.В., Голубев В.И. 726

8. АКУСТИЧЕСКАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ КАРБОНАТНОЙ ПОРОДЫ
Лебедев А.В. 732

9. АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ ПРИ ПОДГОТОВКЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОСКАЛЬЗЫВАНИЯ ПО ГЕТЕРОГЕННОМУ РАЗЛОМУ В КРУПНОМАСШТАБНОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ
Морозова К.Г., Остапчук А.А., Павлов Д.В 736

10. МУЛЬТИМАСШТАБНЫЙ ЭНТРОПИЙНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ ОБДЕЛКИ ТОННЕЛЕЙ
Лозовский И.Н., Чуркин А.А., Жостков Р.А. 737

11. ГИПОТЕЗА О ДВУХ МЕХАНИЗМАХ ФОРМИРОВАНИИ ВОЛН ЦУНАМИ ПРИ ИЗВЕРЖЕНИИ ВУЛКАНА ХУНГА-ТОНГА 15.01.2022
Мазова Р.Е., Куркин А.А. 738

12. ТРЁХМЕРНОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАССЕЯНИЯ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ШУМА НА ОДИНОЧНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ДНА МЕЛКОГО ПОКРЫТОГО ЛЬДОМ МОРЯ
Жостков Р.А. 740

13. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕКТОРНЫХ ПРИЕМНИКОВ СОКОЛЕБЛЮЩЕГОСЯ ТИПА И С НЕПОДВИЖНЫМ КОРПУСОМ В ЗАДАЧАХ СЕЙСМОГИДРОАКУСТИКИ
Шуруп А.С., Дмитриев В.Г., Коваленко А.С. 741

14. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ РАСПРЕДЕЛЕННОГО АКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ ЛЕДОВОГО ПОЛЯ
Гравиров В.В., Преснов Д.А.....743

15. МОДЕЛЬ ЗАТУХАНИЯ ЗВУКА ПРИ МЕДЛЕННОЙ РЕЛАКСАЦИИ В КАРБОНАТНОЙ ПОРОДЕ
Лебедев А.В.....744

16. СОПОСТАВЛЕНИЕ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА ВЕРТОЛЕТА С ВУЛКАНИЧЕСКИМ ТРЕМОРОМ
Шамаев Н.В., Преснов Д.А. 748

УДК 550.34 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39582

Роль скважинных геоакустических измерений в системе прогноза сейсмической опасности

В.А. Гаврилов[1,2], Ю.Ю. Бусс[1], Ю.В. Морозова[1,2], Полтавцева Е.В[1,2].

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,

г. Петропавловск-Камчатский, б-р Пийпа, 9.

Камчатский государственный университет им. Витуса Беринга,

г. Петропавловск-Камчатский, ул.Пограничная,4.

E-mail: vgavr1403@mail.ru

Аннотация: В настоящее время информационной основой системы средне- и краткосрочного прогнозирования сейсмической опасности для района Петропавловска-Камчатского, являются данные функционирующей с 2000 г. в этой зоне Сети комплексных скважинных измерений Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН. В состав Сети входят четыре телеметрических пункта, обеспечивающих непрерывный мониторинг процессов подготовки сильных землетрясений по семи видам геофизических измерений в глубоких скважинах, включая геоакустические измерения на глубинах до 1000 м. Проведение скважинных геоакустических измерений в комплексе с электромагнитными измерениями, в которых используются подземные электрические антенны, позволило получить ряд важных научных результатов, в том числе, разработать подходы к эффективному средне- и краткосрочному прогнозированию сейсмической опасности.

The role of borehole geoacoustic measurements in the seismic hazard forecasting system

Gavrilov V.A. [1, 2], Buss Yu.Yu. [1], Morozova Yu.V. [1,2], Poltavtseva E.V. [1,2]

[1]Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Piip blvd, 9

[2]Vitus Bering Kamchatka State University, Petropavlovsk-Kamchatsky, Pogranichnaya St., 4

e-mail: vgavr1403@mail.ru

Abstract: The information basis for the system of medium- and short-term seismic hazard forecasting for the Petropavlovsk-Kamchatsky area is data from the Integrated Borehole Measurement Network of the Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, which has been operating in this area since 2000. The Network includes four telemetry sites for seven types of geophysical measurements in deep boreholes, providing continuous monitoring of the preparation of strong earthquakes, including

geoacoustic measurements at depths up to 1000 m. Comprehensive monitoring combining borehole geoacoustic and electromagnetic measurements using underground electric antennas has provided significant scientific results. In particular, approaches to effective medium- and short-term forecasting of seismic hazards have been developed.

Keywords: earthquake, borehole geoacoustic measurements, seismic hazard forecasting

Введение

В настоящее время мониторинг процессов подготовки сильных камчатских землетрясений в зоне Петропавловск-Камчатской городской агломерации проводится Сетью комплексных скважинных измерений, созданной Институтом вулканологии и сейсмологии ДВО РАН. При этом используются данные семи видов скважинных геофизических измерений, а также данные мониторинга полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы и деформационного ГНСС- мониторинга. Достаточно подробная информация о скважинных измерениях содержится в [Гаврилов и др., 2021].

Одним из основных (базовых) методов скважинного мониторинга является «ГАЭ-метод», физической основой которого является эффект модуляции интенсивности геоакустической эмиссии (ГАЭ) слабым переменным электрическим полем СНЧ диапазона частот, открытый в ходе многолетних исследований на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне (ПГП)]. Предполагаемый физический механизм указанного эффекта изложен в [Гаврилов, 2017], где показывается, что амплитуда откликов ГАЭ на воздействие слабого электромагнитного излучения (ЭМИ) СНЧ диапазона (первые Гц – первые кГц) определяется амплитудой напряженности ЭМИ и общей площадью соприкосновения жидкой и твердой фаз в контролируемом геофоном объеме геосреды. При достаточной влажности геосреды воздействие на геоакустические процессы внешнего ЭМИ СНЧ диапазона с медленно меняющейся амплитудой напряженности электрического поля будет вызывать соответствующие изменения амплитуды ГАЭ. Так, например, суточные вариации амплитуды напряженности ЭМИ, воздействующего на геосреду, приводят к соответствующим суточным вариациям амплитуды ГАЭ – откликам ГАЭ на воздействие ЭМИ. Интенсификация фильтрационных процессов на активной стадии подготовки близкого сильного землетрясения приводит к изменениям площади соприкосновения жидкой и твердой фаз для значительных объемов геосреды и соответствующим изменениям амплитуд откликов ГАЭ. Как показывают расчеты и результаты измерений на ПГП, при использовании для геоакустических измерений глубоких скважин ГАЭ-метод позволяет контролировать изменения влажности геосреды, обусловленные процессами подготовки землетрясений, в зоне радиусом порядка 3 км.

При реализации ГАЭ-метода для контроля параметров электромагнитного излучения, воздействующего на геосреду в зоне скважины, одновременно с геоакустическими измерениями на базе той же скважины проводятся электромагнитные измерения в том же диапазоне частот с использованием подземной вертикальной электрической антенны. Основным конструктивным элементом такой антенны является металлическая обсадная колонна скважины [Гаврилов, 2013]. Данные, получаемые в ходе электромагнитных измерений с использованием подземной антенны, являются также основой «ЭМИ-метода», позволяющего проводить высокочувствительный непрерывный мониторинг изменений удельного электрического сопротивления (УЭС) геосреды в зоне скважины до глубины около 2.5 км [Гаврилов и др., 2021]. При этом в качестве сигнала, зондирующего геосреду, используется непрерывное фоновое электромагнитное излучение техногенного или природного (атмосферного) происхождения. Указанный метод, наряду с ГАЭ-методом, является базовым методом мониторинга процессов подготовки сильных камчатских землетрясений Сети комплексных скважинных измерений. Полосовая фильтрация широкополосного сигнала на выходе подземной электрической антенны позволяет проводить мониторинг изменений УЭС геосреды одновременно на разных глубинах. Получаемая при этом информация о характере динамики поровой жидкости в зоне измерений играет важную роль при интерпретации результатов ГАЭ измерений.

Подходы к прогнозированию сейсмической опасности

С начала 2005 г. и до момента Камчатского мегаземлетрясения (29.07.2025; M_w=8.8) произошло **четыре** сильных землетрясения с Mw =6.9 -7.4, вызвавших в районе Петропавловска-Камчатского **сотрясения до 6 баллов.** Для **трех** из них авторами были даны оправдавшиеся краткосрочные прогнозы [Гаврилов и др., 2025].

Успешные прогнозы сильных камчатских землетрясений являются фактическим подтверждением эффективности разработанного авторами принципиально нового подхода к прогнозированию сейсмической опасности для района Петропавловск-Камчатской агломерации. Указанный подход достаточно подробно изложен в [Гаврилов и др., 2025]. Его ключевые позиции заключаются в следующем.

1. Точные краткосрочные прогнозы времени (погрешность ±3 сут.), магнитуды землетрясения (погрешность ±0.1), а также достижение высокой степени успешности прогнозов (не менее 85-90%), на которых настаивает ряд исследователей, невозможны. Между тем, подобные требования к высокой точности краткосрочного прогнозирования землетрясений фактически ничем не обоснованы, поскольку жителей, а также представителей органов власти и структур МЧС, в первую очередь, интересует не точные параметры

прогнозируемого землетрясения, а степень возможных сотрясений на ближайшие дни-недели для конкретного района. По этой причине главной целью краткосрочного прогнозирования должна являться качественная оценка текущей сейсмической опасности для контролируемой зоны, а не высокоточное (заведомо невозможное!) прогнозирование параметров ожидаемого землетрясения. При этом оценки сейсмической опасности должны базироваться на текущих результатах мониторинга процессов подготовки сильных землетрясений в зоне Авачинского залива, способных вызвать значительные (не менее 6 баллов) сотрясения в районе Петропавловск-Камчатской агломерации. На начальном этапе достаточны качественные трехступенчатые («низкая», «повышенная», «значительно повышенная») оценки. Это дает возможность своевременно информировать власти и структуры МЧС в случае оснований для значительной вероятности сотрясений не менее 6 баллов в указанном районе на ближайшие 2-4 недели. Фактически и в этом случае речь идет о краткосрочном прогнозировании землетрясений, однако, как показал многолетний опыт исследований авторов, в таком случае требования к оценке параметров прогнозируемого землетрясения могут быть ограничены оценкой величины S - процентного отношения длины очага землетрясения к гипоцентральному расстоянию.

2. Мировой опыт многолетних исследований показывает, что, опираясь только на «предвестники», нельзя рассчитывать на надежное краткосрочное прогнозирование землетрясений. Анализ текущих результатов геофизических и сейсмических измерений, проводимых в целях краткосрочного прогнозирования, должен проводиться в рамках ключевых положений, обоснованно выбранной базовой физической модели (концепции) подготовки землетрясения. При наличии Сети комплексных геофизических наблюдений это позволяет сосредоточиться не на поисках «предвестников», а на своевременном выявлении в рамках базовой модели начала изменений в характере результатов мониторинга НДС геосреды, указывающих на подготовку крупного землетрясения. В настоящее время в качестве базовой физической модели подготовки сильных землетрясений в зоне Авачинского залива авторы используют модель консолидации И.П. Добровольского [Добровольский, 2009].

Подтверждением эффективности указанного подхода можно считать успешные краткосрочные прогнозы форшоков Камчатского мегаземлетрясения – землетрясений Шипунское-1 (17.08.2024; M_w=7.0) и Шипунское-2 (20.07.2025, M_w=7.4), вызвавших в г. Петропавловске-Камчатском сотрясения до 6 баллов. Рис. 1 поясняет, какие именно результаты текущего комплексного скважинного мониторинга геосреды в зоне Авачинского залива служили основанием для прогнозных заключений.

Первое прогнозное заключение, связанное с подготовкой землетрясения Шипунское-1, было отправлено 19.12.2023 г. в адрес Камчатского филиала Российского экспертного совета

(КФ РЭС). В нем сообщалось о “**повышенной** вероятности землетрясения с параметром S≥18% на ближайшие 10 суток” (см. рис. 1).

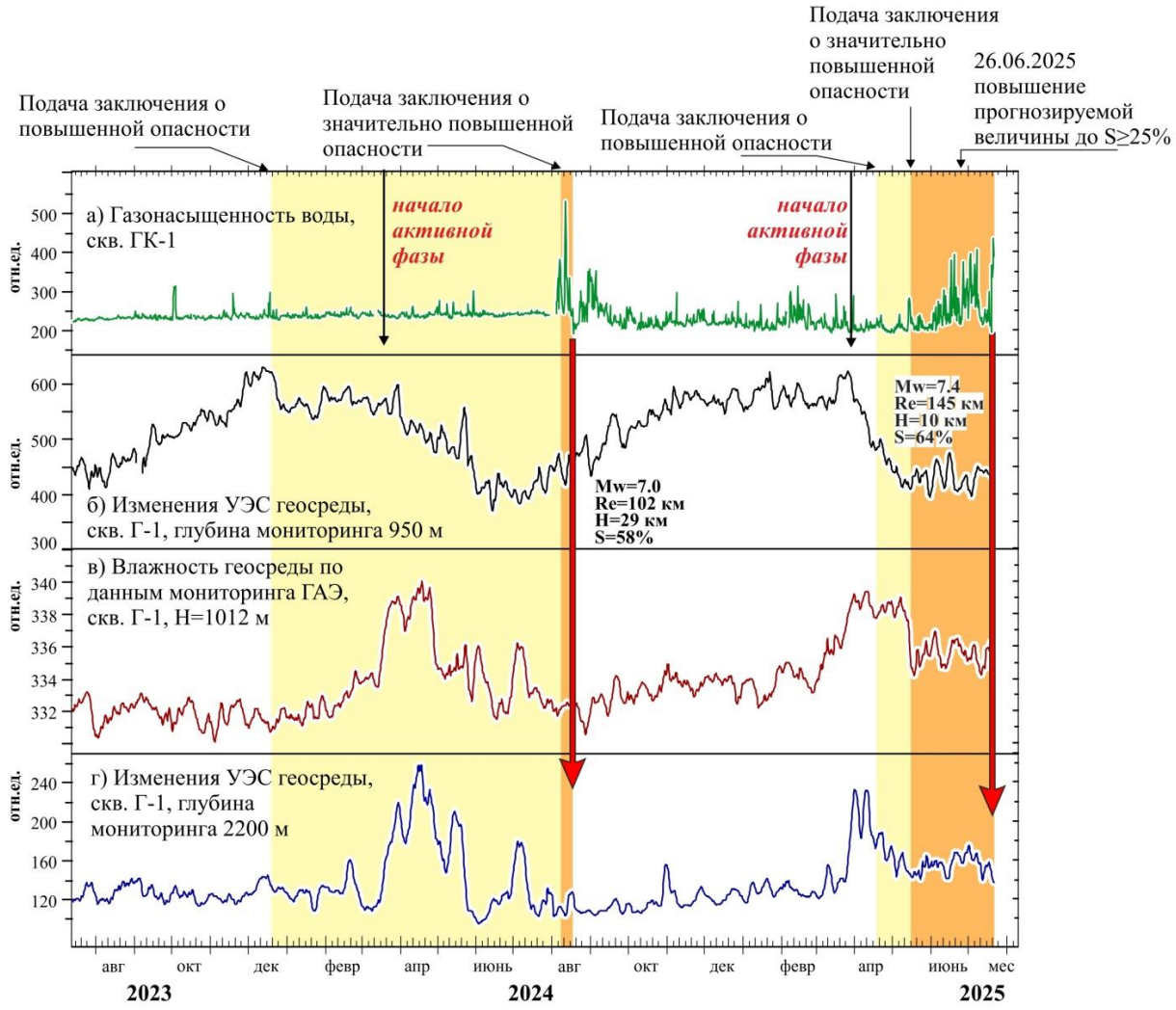


Рис. 1. Хронология подачи прогнозных заключений о сейсмической опасности накануне землетрясений Шипунское-1 и Шипунское-2.

Основанием для указанного заключения служили изменения в характере данных мониторинга УЭС геосреды (рис. 1б), а также данные скважинных геоакустических измерений (рис. 1в). В рамках модели консолидации такие данные позволяли сделать заключение о переходе от стадии консолидации к стадии распада неоднородности. Это заключение затем подтверждалось каждые две недели вплоть до 08.08.2024 г., поскольку до этого момента текущие данные комплексного скважинного мониторинга не давали серьезных оснований для изменений формулировки заключения.

8 августа 2024 г. было сделано Заключение уже о “**значительно повышенной** вероятности сильного землетрясения с величиной параметра S не менее 18% на период с 08 августа по 22 августа 2024 г.”. Основанием для такого Заключения явился, в первую очередь, резкий и значительный рост газонасыщенности воды скважины ГК-1, начавшийся 1 августа

2024 г. (рис. 1а). Соответствующее указанным в Заключении параметрам землетрясение – землетрясение Шипунское-1, произошло 17 августа 2024 г., т.е. спустя 9 суток после подачи заключения о значительной вероятности сильного землетрясения в районе г. Петропавловска-Камчатского.

Краткосрочное прогнозирование землетрясения Шипунское-2 проходило такие же стадии, но с некоторыми дополнениями и уточнениями (см. рис. 1).

Заключение

В настоящее время скважинные геоакустические измерения, наряду с электромагнитными измерениями с использованием подземных электрических антенн, являются базовыми видами измерений в функционирующей уже более 20 лет системе среднесрочного и краткосрочного прогнозирования сейсмической опасности для района Петропавловск-Камчатской городской агломерации. Подтверждением значительной роли скважинных геоакустических измерений при решении задач, связанных с прогнозированием сейсмической опасности, являются успешные краткосрочные прогнозы сильных камчатских землетрясений.

Список литературы

1. *Гаврилов В.А.* Воздействие переменных электромагнитных полей на геоакустические процессы: эмпирические закономерности и физические механизмы: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. ФГБУН Институт физики Земли им.О.Ю. Шмидта РАН, Москва, 2017. 385 с.

2. *Гаврилов В.А., Дещеревский А.В., Власов Ю.А. и др.* Сеть комплексных скважинных измерений Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона // Сейсмические приборы. 2021. Т. 57, № 3. С. 52-78.

3. *Гаврилов В.А., Бусс Ю.Ю., Полтавцева Е.В. и др.* Подходы к краткосрочному прогнозированию сейсмической опасности для зоны Авачинского залива (Камчатка) // Russian Journal of Earth Sciences. 2025. Т. 25. ES5008. DOI:10.2205/2025es001054. EDN: VEJDLM

4. *Добровольский И.П.* Математическая теория подготовки и прогноза тектонического землетрясения. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 240 с.

УДК: 534.222.2;550.834.8;556.331.52:550.348 DOI: 10.34756/GEOS.2026.17.39583

Релаксация акустических параметров горных пород после землетрясений

А.В. Лебедев[1,a], Л.А. Островский[1,b]

[1]Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-ГреховаРАН,

Нижний Новгород, Ульянова, 46

E-mail:[a]swan@ipfran.ru;[b]lev.ostrovsky@gmail.com

Множественные лабораторные и натурные эксперименты показывают, что после сильного воздействия наблюдается медленная релаксация упругих параметров среды. После землетрясений процессы релаксации могут длиться от нескольких месяцев до нескольких лет. Проведен анализ долговременных наблюдений временных рядов для волн Рэлея, полученных в сейсмоакустической обсерватории в Паркфилд (Калифорния). В результате анализа показано, что предложенная нами ранее теория явления медленной релаксации в лабораторных условиях, пригодна и для описания крупномасштабных процессов. Полученные результаты могут быть использованы для дистанционной диагностики напряженного состояния горных пород.

Ключевые слова: акустика гетерогенных сред, нелинейная акустика, медленная релаксация
PACS: 43.25.Dc; 43.25.Ed; 43.25.Fe; 91.60.Lj.−c

Введение

Динамические акустические свойства горных пород и других структурно-неоднородных материалов характеризуются (1) сильной акустической нелинейностью, (2) гистерезисом зависимости напряжения от деформаций и (3) длительной релаксацией акустических характеристик после интенсивного воздействия. Процесс релаксации может длиться от нескольких минут до нескольких часов в лабораторных условиях и от нескольких месяцев до нескольких лет в натурных условиях. Логарифмический закон релаксации наблюдался в лабораторных условиях при воздействии с амплитудой деформации более 10^{-7}–10^{-6}. Обзоры имеющихся результатов представлены в [1–3]. В природных условиях релаксационный процесс более сложен и зависит от геологии, в том числе, скорость релаксации может зависеть от глубины.

Медленная релаксация связывается с термически активируемыми процессами преодоления энергетического барьера, разделяющего метастабильное и стабильное состояние контактов зерен, неровностей и т.п. После интенсивного воздействия часть контактов рвется и

переходит в возбужденное (метастабильное) состояние, большая часть разорванных контактов восстанавливается с гистерезисом [4–6]. В результате нелинейный гистерезис и медленная релаксация оказываются имеющими общую физическую природу.

Описание медленной релаксации

Скорость деформаций ε_t, связанная с контактом зерен/неровностей в твердом теле описывается уравнением Аррениуса [7]: $\varepsilon_t = A\exp\left(-\frac{\Delta G(p)}{kT}\right)$, где k – постоянная Больцмана, T– абсолютная температура, $\Delta G(p)$ – энергия активации Гиббса, зависящая от давления p [8], множитель A предполагается независящим или слабо зависящим от температуры. Полагая процесс релаксации медленным и изотермическим, можно выразить дифференциал потенциала Гиббса как $dG=Vdp$, где V – объем активации [8]. Давление равно $p=-M\varepsilon$, где M – модуль объемной жесткости и ε – остаточная объемная деформация. После преобразований получаем следующее выражение для временного изменения макроскопической остаточной деформации [7]: $\varepsilon(t) = \varepsilon_0 - \frac{\Lambda}{M}\ln\frac{t+t_0}{t_0}$, где $\varepsilon_0 > 0$ – начальное значение деформации, $\Lambda = \frac{kT}{\mathrm{V}}$, $t_0 = -\frac{\Lambda}{M\varepsilon_{t0}} > 0$, $\varepsilon_{t0} < 0$ – начальная скорость макроскопической деформации. Параметр квадратичной нелинейности β позволяет связать остаточную деформацию с измеряемым относительным изменением скорости пробной волны: $\delta c_{pr} = \beta\varepsilon$. Поскольку $\beta < 0$, $\delta c_{pr} \le 0$ и равенство нулю отвечает окончанию релаксации. Время релаксации равно $\tau = t_0\left(\mathrm{e}^{\zeta} - 1\right)$, где $\zeta = \frac{M\varepsilon_0}{\Lambda} \gg 1$ не зависит от объемной плотности метастабильных состояний ϕ, поскольку величины ε_0 и Λ пропорциональны ϕ.

Интерпретация экспериментальных данных

Результаты долговременных измерений скорости волны Рэлея представлены в [9]. Землетрясение с магнитудой около 6 имело место в 2004 году. На рисунке 1 приведены временные зависимости измеренных относительных изменений скорости волны Рэлея и их аппроксимация по формулам теоретической модели. Символами показаны результаты измерений, вертикальные отрезки отвечают погрешности измерений, сплошные линии построены по формулам теоретической модели (подробнее в [7]). Различным частотным диапазонам отвечают различные глубины проникновения волны Рэлея, что позволяет установить зависимость характеристик релаксации от глубины. Видимое отличие скоростей релаксации и начальных возмущений для различных частот позволило нашим коллегам [9] утверждать, что на каждой глубине процессы происходят по-разному. Однако, как следует из рисунка 2, где представлена зависимость времени релаксации от глубины проникновения волны Рэлея, более разумным является предположение о единой природе процесса релаксации на всех исследованных глубинах. Отличие же скорости релаксации и начальных

значений возмущений скорости волны Рэлея следует связать с зависимостью плотности метастабильных состояний от глубины. Оценки пространственных масштабов, связанных с релаксацией, дают величины порядка нескольких нанометров, как и для экспериментальных результатов, полученных в лаборатории [4].

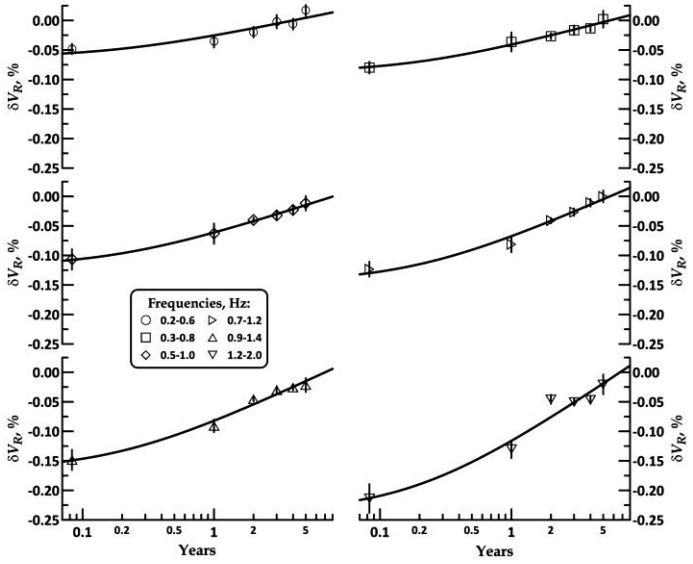


Рисунок 1 – Относительные изменения скорости волны Рэлея.

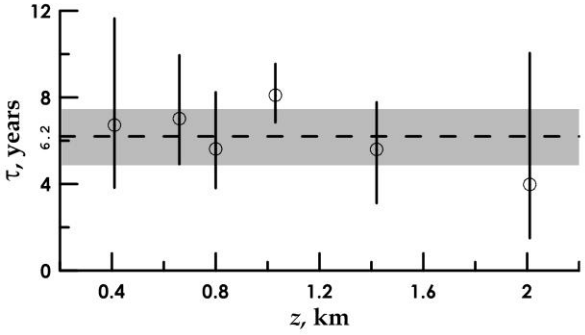


Рисунок 2 – Зависимость времени релаксации от глубины

Заключение

Подведем итог:

1. Термодинамическая модель релаксации, которая ранее была проверена на лабораторных экспериментах, оказалась пригодной для описания крупномасштабных явлений релаксации после землетрясения. Модель описывает как логарифмический (наиболее долгий) так и начальный (переходный процесс) этапы релаксации.
2. Натурные наблюдения [9] находятся в удовлетворительном согласии с теоретической моделью. В частности, время релаксации оказывается приблизительно одинаковым для всех исследованных глубин.
3. Оценка величины объема активации приводит к тем же по порядку пространственным масштабам, что и для множества лабораторных экспериментов для широкого спектра материалов. Это указывает на универсальность механизма медленной релаксации независимо от масштаба явлений, которые инициировали процесс релаксации.

Как следует из теоретического описания, возмущения скорости пробной волны связаны с остаточными объемными деформациями. Это позволяет выполнять дистанционную диагностику таких деформаций.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №25-22-00617.

Список литературы

1. *Ostrovsky L., and Johnson P. //* Riv. Nuovo Cim. 2001. **24**.N7, P.1.
2. *Guyer R., Johnson P.* Nonlinear Mesoscopic Elasticity: TheComplex Behaviour of Rocks, Soil, Concrete (Wiley-VCH, New York), 2009. 410p.
3. *TenCate J.* // Pure Appl. Geophys. 2011. **168**. N.12, P.2211.
4. *Lebedev A.V., Ostrovsky L.A.*// Acoust. Phys. 2014. **60**. N.5. P.555.
5. *Ostrovsky L., et. al.* // JGR Solid Earth 2019. **124**N.5, P.5003.
6. *Lebedev A.V.* // Acoust. Phys. 2023. **69**. N.1. P. 58.
7. *Lebedev A.V., Ostrovsky L.A.//* JASA. 2025. **157**. N.3. P.1862.
8. *Мерер Х.*Диффузия в твердых телах. Интеллект, 2011. 536с.
9. *Wu C. et.al.* // Geophys.Res. Lett. 2016. **43**.P.6129.

Relaxation of acoustic parameters in rocks after earthquakes

A.V. Lebedev[1,a]**, L.A. Ostrovsky**[1,b]

Institute of Applied Physics of the RAS.N. Novgorod603950, Russia.

E-mail:[a]*swan@ipfran.ru;*[b]*lev.ostrovsky@gmail.com*

Numerous measurements show that after a strong earthquake the velocity of seismic waves changes and then slowly returns to its original value. The relaxation process can last from several months to several years, while the seismic wave velocity often changes logarithmically with time similar to what was observed in laboratory experiments. In this work, the relevant experimental results, including long-term observations at the Parkfield Seismic Observatory (California), are analyzed using the previously developed physical model that was successfully used to describe “slow time” effects in laboratory experiments. The model is based on an Arrhenius-type equation describing the evolution of contacts between grains and in cracks. The results of simulations of the recovery time are in satisfactory agreement with the experimental data. These results may be used for remote diagnostics of rocks’ stress state.

Keywords: acoustics of heterogeneous media, nonlinear acoustics, slow relaxation

PACS: 43.25.Dc; 43.25.Ed; 43.25.Fe; 91.60.Lj.−c

УДК: 550.34 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39584

Baikal Rift Zone (BRZ) are presented, and the relationship between the identified patterns in the observed variations of the signal phase difference and the seismic regime of the BRZ is demonstrated.

Keywords: active seismology, HPP, differential phase measurement method

Funding. This work was carried out under state contract with ICMMG SB RAS FWNM-2025-0004

PACS: 91.30.−f

Введение

В последние несколько десятилетий в активной сейсмологии широко применялись технологии вибрационного просвечивания Земли (ВПЗ) с использованием мощных сейсмических источников. Сущность метода ВПЗ состоит в зондировании глубоких недр Земли продолжительными вибрационными колебаниями. Мощный сейсмический вибратор генерирует монохроматический или широкополосный свип-сигнал, который проходит сквозь среду к поверхности, на которой расположена регистрирующая станция, преломившись и отразившись на геологических границах. При длительности сеансов излучения до одного часа на частотах ниже 10 Гц и удалении пунктов регистрации до 300–350 км, возможно зондирование глубин вплоть до верхней мантии [1–5]. Высокая амплитудно-фазовая идентичность сигналов от мощных вибраторов позволила обнаруживать малые изменения характеристик среды, в том числе регистрировать лунно-солнечные вариации [2].

Несмотря на то, что методы ВПЗ показали свою эффективность для широкого класса задач геофизики, их применение требует значительных финансовых вложений и для большинства исследователей остается недоступным. В связи с этим, перспективным становится использование колебаний, возбуждаемых гидроагрегатами ГЭС. Радиально-осевые вибрации, возникающие при вращении многотонных гидроагрегатов, передаются на плотину ГЭС и геологическую среду, становясь мощным источником сейсмических волн, которые могут распространяться на значительные расстояния [6–9].

В данной работе мы предлагаем новый метод непрерывного вибросейсмического мониторинга геодинамических процессов. Метод демонстрируется на примере мониторинга процессов подготовки землетрясений в Байкальском рифтовой зоне (БРЗ), в качестве вибросейсмического источника использовались гидроагрегаты Братской ГЭС.

1. Данные и методы

Для экспериментов мы использовали данные сейсмостанций «Куяда» (региональный код KYD) и «Зун-Мурино» (региональный код ZUMR), входящими в состав сети комплексного

мониторинга опасных геологических процессов в Прибайкалье [10]. Обе сейсмостанции расположены на расстоянии около 500 км от Братской ГЭС, расстояние между ними 240 км. Станции оборудованы высокочувствительной аппаратурой компании Nanometrics и размещены в районах с низким уровнем техногенных помех. Данные с сейсмостанций поступают на цифровую платформу (https://izk.sscc.ru), в составе которой имеются интерактивные средства для визуализации и анализа данных [11].

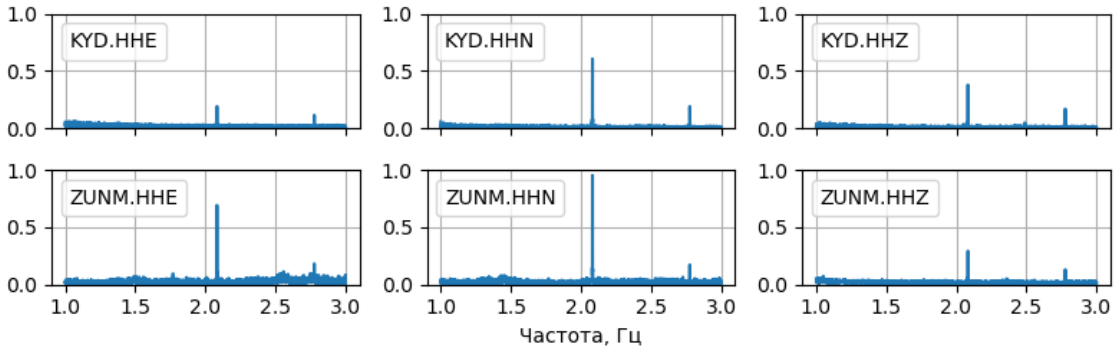


Рис. 1. Нормированные амплитудные спектры микросейсмического шума

На рис. 1 представлены нормированные спектры микросейсмического шума (МСШ), регистрируемого сейсмостанциями. Спектры демонстрируют присутствие узкополосного сигнала на частоте 2.083 Гц. Сигнал такой частоты генерируется при вращении гидроагрегатов Братской ГЭС. Полевые эксперименты показали присутствие сигнала 2.083 Гц в спектре МСШ на расстоянии до 1200 км от источника [8].

Главным недостатком ГЭС, как сейсмических источников гармонического сигнала является дрейф частоты и амплитуды, Основная причина дрейфа заключается в суточном колебании баланса мощности. Относительное отклонение частоты 2.083 Гц от номинала может достигать 10^{-3}, что укладывается в допуски для объединённой энергосистемы, но не позволяет применять традиционные фазовые методы активного вибросейсмического мониторинга [3], использующие источники с более стабильной частотой. Поэтому для компенсации дрейфа мы применили дифференциальный метод измерений фазы узкополосного сигнала от удалённого сейсмического источника, который заключается в том, что для мониторинга геодинамических процессов в районе одной из сейсмостанций, вторая используется в качестве опорного компенсирующего канала. При этом траектория распространения сейсмических волн от мощного источника (ГЭС) к опорной сейсмостанции не должна пересекать зону развития геодинамического процесса, за которым предполагается наблюдать.

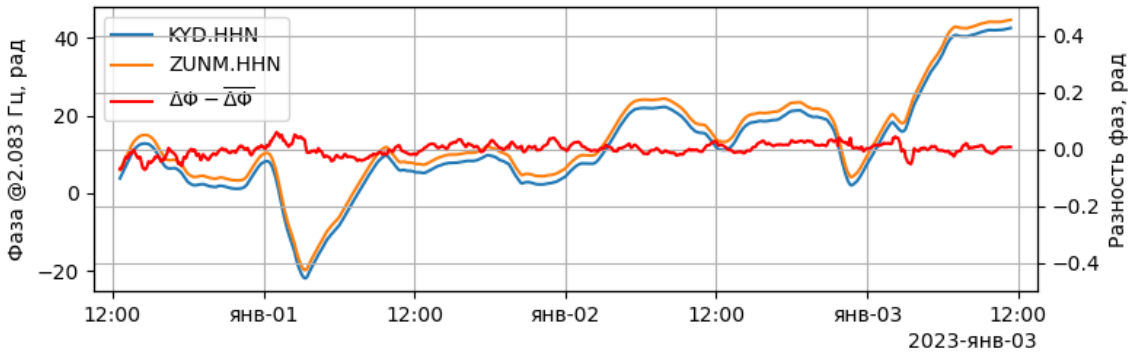


Рис. 2. Фаза и разность фаз сигнала 2.083 Гц

На рис. 2 представлен график фаз и разности фаз сигнала 2.083 Гц, зарегистрированного каналами N-S сейсмостанций KYD и ZUMR на интервале трое суток. Фаза определялась методом дискретного преобразования Фурье в скользящем временном окне шириной 600 с. Стандартное отклонение разности фаз для горизонтального канала N-S составило 0.02 рад (1.1°), для вертикального канала 0.03 рад (1.7°).

2. Результаты экспериментов

На рис. 3 приведена карта-схема эксперимента по наблюдению вариаций фазы сигнала 2.083 Гц на этапах подготовки местного землетрясения 2023-05-07 14:07:01, M=4.4. Эпицентральное расстояние до сейсмостанций KYD и ZUNM составляет 42 км и 275 км.

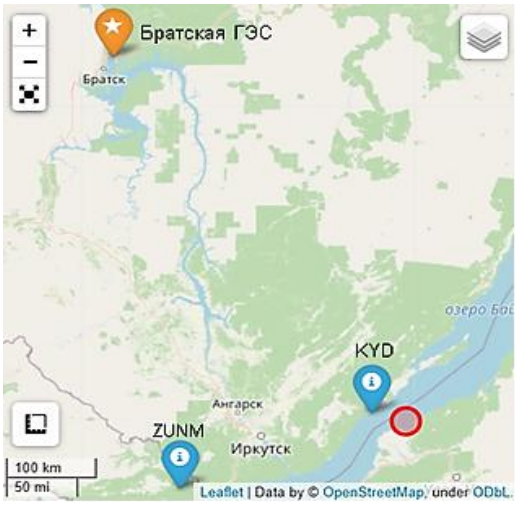


Рис. 3. Карта-схема эксперимента, красным кружком отмечен эпицентр землетрясения.

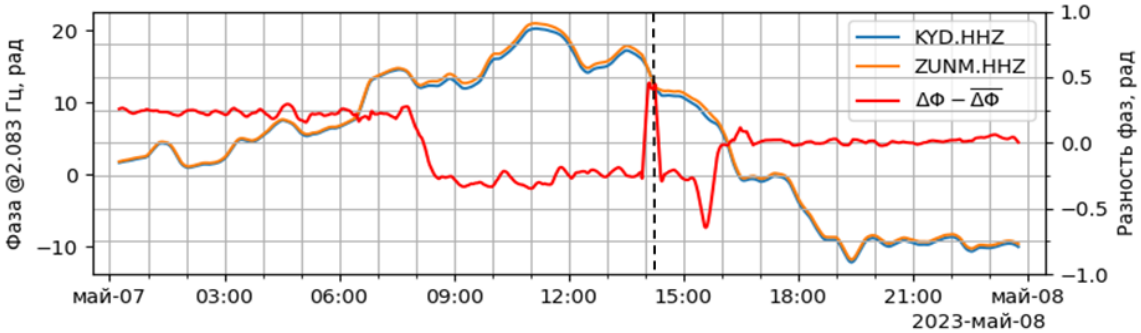


Рис. 4. Вариации фазы сигнала 2.083 Гц во время землетрясения 2023-05-07 14:07:01.

На рис. 4 представлены графики фазы сигнала 2.083 Гц на двух сейсмостанциях и разность фаз во время развития землетрясения. Отклонение разности фаз от равновесного значения за шесть часов до толчка (время в очаге обозначено на графике пунктирной линией) и два часа после него можно отнести к информативным признакам сейсмической активации, связанной с геодинамическими процессами в среде во время подготовки и развития землетрясения. При необходимости вариации фазы могут быть пересчитаны в вариации сейсмических скоростей [8]. Аналогичные результаты получены при анализе данных по нескольким другим землетрясениям в БРЗ. Предварительно установлено, что линейными размерами зон деформационных процессов в период подготовки землетрясений могут составлять от нескольких десятков километров для слабых сейсмических событий до нескольких сотен километров для средних и сильных.

Заключение

Предложен дифференциальный метод активного вибросейсмического мониторинга с использованием вибрации гидроагрегатов Братской ГЭС на частоте 2.083 Гц в качестве удалённого источника сейсмического сигнала. Проведенные эксперименты показали, что геодинамические процессы, происходящие в связи с сейсмической активацией, находят своё отражение в измеряемом параметре и обнаруживаются за несколько часов до основного толчка и продолжаются после него до 10–12 часов. Предложенный метод активного вибросейсмического мониторинга представляется перспективным в задачах изучения разномасштабных геодинамических процессов в твёрдой Земле, включая и очаговые структуры местных землетрясений. Особый интерес представляет обнаруженный в экспериментах временной интервал наблюдаемых вариаций фазы в ходе подготовки основного толчка. Мы предполагаем продолжить наблюдения в других сейсмоопасных регионах, находящихся в зоне «прозвучивания» гармоническими сигналами мощных ГЭС, с целью более глубокого изучения обнаруженного явления.

Список литературы

1. *Глинский Б.М., Ковалевский В.В., Хайретдинов М.С.* Взаимосвязь волновых полей мощных вибраторов с атмосферными и геодинамическими процессами // Геология и геофизика. 1999. **40**, № 3. С. 431–441.
2. *Алексеев А.С., Глинский Б.М., Геза Н.И., Еманов А.Ф., Кашун В.Н., Ковалевский В.В., Селезнев В.С., Соловьев В.М., Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е. и др.* // Активная сейсмология с мощными вибрационными источниками. Отв. ред. Г.М. Цибульчик. - Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН, Филиал «Гео» Изд. СО РАН, 2004. С. 387.

3. *Николаев* А.В. Проблемы нелинейной сейсмики. Под ред. А.В. Николаева и И.Н. Галкина. Наука. М., 1987.
4. *Ковалевский В.В., Собисевич А.Л., Тубанов Ц.А., Брагинская Л.П., Григорюк А.П.* Вибросейсмические исследования Байкальской рифтовой зоны с мощным вибратором ЦВО-100 // Геодинамика и тектонофизика. 2022. **13,** № 2.
5. Valery V. Kovalevsky, Boris M. Glinsky, Marat S. Khairetdinov, Alexey G. Fatyanov, Dmitriy A. Karavaev, Lyudmila P. Braginskaya, Andrey P. Grigoryuk, and Tsyren A. Tubanov. Active vibromonitoring: Experimental systems and fieldwork results. // Active geophysical monitoring. Third edition. Ed. H. Mikada, M. Zhdanov, J Kasahara. Elsevier. 2025. PP. 77-95.
6. *Kelly H. Liu; Stephen S. Gao* Characterization of a Continuous, Very Narrowband Seismic Signal near 2.08 Hz // Bull. Seismol. Soc. Am (2001) 91 (6): 1910–1916.
7. *Bungum, H., Risbo, T. and Hjortenberg, E.* (1977). Precise continuous monitoring of seismic velocity variations and their possible connection to solid Earth tides // J. of Geoph. Research, 82 (33), pp. 5365–5373.
8. *Götz H. R. Bokelmann; Stefan Baisch* Nature of Narrow-Band Signals at 2.083 Hz // Bull. Seismol. Soc. Am (1999) 89 (1): 156–164.
9. Изучение периодического сейсмического сигнала от Нурекской ГЭС *Александров А.Л., Володин А.А., Дададжанов И.А., Зеликман Э.И., Николаев А.В.* // Исследование Земли невзрывными сейсмическими источниками. Наука. М., 1981. С. 260–265.
10. *Семинский К.Ж., Добрынина А.А., Борняков С.А., Саньков В.А., Поспеев А.В., Рассказов С.В., Перевалова Н.П., Семинский И.К., Лухнев А.В., Бобров А.А. и др.* Комплексный мониторинг опасных геологических процессов в Прибайкалье: организация пилотной сети и первые результаты // Геодинамика и тектонофизика. 2022. **13**, № 5.
11. *Braginskaya, L.P., Grigoryuk, A.P., Kovalevsky, V.V. et al.* Digital Platform for Integrated Geophysical Investigations in the Baikal Region // Seism. Instr. 59, 54–62 (2023).

Сравнение реализаций алгоритма расчета амплитудных характеристик поверхностных акустических волн в неоднородных средах

Жарков Д.А.[1)]

[1)] *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва*

Тел.: +7(920)633-50-53; E-mail: denis.Zharkov2014@yandex.ru

Предложена реализация алгоритма расчета амплитудных характеристик поверхностных акустических волн (ПАВ) в неоднородных средах с малым изменением параметров по горизонтали в среде Python. Произведено сравнение с аналогичным алгоритмом, реализованным в среде Wolfram Mathematica. Продемонстрировано соответствие результатов, получаемых обоими реализациями, с результатами независимо продленного численного моделирования. Показано, что Python реализация, во-первых, является на 2-4 порядка быстрее Wolfram реализации и, во-вторых, позволяет рассчитывать частотную зависимость относительной амплитуды ПАВ на поверхности среды для сред с большим (более 100) количеством слоев, что затруднительно в Wolfram реализации, которая имеет выраженную зависимость времени расчета от числа слоев. Указанные преимущества позволяют использовать предложенный алгоритм для более эффективного решения обратной задачи микросейсмического зондирования, которая требует многократного решения прямой задачи.
Работа выполнена в рамках Государственного задания ИФЗ РАН.

Ключевые слова: неоднородная среда, поверхностная акустическая волна, микросейсмическое зондирование, ММЗ, амплитудные характеристики

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39585

Влияние неоднородной водонасыщенности на поверхностные волны в пористо-упругом грунте

Фоменко С.И.[1)], Ромашин А.К.[1)]

[1)] Институт математики, механики и информатики, Кубанский государственный университет, Краснодар.

E-mail: sfom@yandex.ru

Пористый материалы весьма распространены в природе. Например, почвы, различные горные породы являются пористыми, насыщенные газом и/или жидкостью средами. Многие биологические ткани, например, костная ткань, древесина также являются пористыми. Причём пористость и состав порового флюида в природных материалах, как правило, является неоднородным. Например, процесс инфильтрации воды в порах грунта демонстрирует сложное нелинейное распределение содержание воды в грунте по глубине, которое зависят от параметров гидравлических параметров среды, начального водонасыщения и времени инфильтрации. Оценка пористости и уровня влаги в почве важно для прогноза и соответственно улучшения показателей урожайности сельскохозяйственных культур. А контроль влажности древесины плодовых деревьев позволяет судить об их здоровье.

Исследование распространения упругих волн в ненасыщенных пористых средах основано на решении краевой задачи для уравнения типа Био-Френкеля с многофазным флюидом для функционально-градиентного полупространства. Решение для установившихся гармонических колебаний получено в интегральной форме. Обсуждаются детали построения математической модели и результаты проведённого численного анализа влияния пористости и профиля входного водонасыщения на фазовые скорости поверхностных волн в пористом многослойном полупространстве.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-21-00915.

Ключевые слова: грунт, неоднородная насыщенность, поверхностная волна

УДК: 534.613 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39586

Испытания макета приемно-излучающего комплекса для низкочастотного зондирования дна в условиях речного водохранилища

А.И. Хилько[1,a], В.И. Калинина[1,b], А.А. Лисин[1,c], А.А. Антонов[1,d], И.А. Капустин[1,e], А.В. Лебедев[1,f]

[1] *ФГБНУ «ФИЦ ИПФ им. А.В. Гапонова-Грехова РАН». 603951, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46*

E-mail: [a] a.khil@ipfran.ru, [b] v.kalinina@ipfran.ru, [c] a.lisin@ipfran.ru, [d] andendton@ipfran.ru, [e] kia@ipfran.ru, [f] swan@ipfran.ru

Аннотация: В работе представлены результаты проведенного эксперимента с использованием нового комплекса для сейсмоакустического зондирования дна и решения геофизических задач распространения сложномодулированных сигналов в толще дна. В состав макета входят: новый продольно-изгибный низкочастотный маломощный гидроакустический излучатель и сейсмоакустическая 24-канальная приемная антенна. Комплекс для низкочастотного сейсмоакустического зондирования дна проходил испытания в мелководном русле реки Волга в Горьковском водохранилище. Используемый излучатель способен возбуждать сложные акустические импульсы в интервале частот от 80 до 2000 Гц. Были проведены измерения амплитудно-частотной характеристики излучателя, а также серии экспериментов по генерации ЛЧМ-импульсов в рабочей полосе излучателя. Проведенные эксперименты показали, что данный акустический источник имеет выраженный резонанс на частоте 126 Гц, что является уникальным показателем для излучателя со сравнительно небольшими размерами в 70 см. Для анализа и оценки параметров сложной слоистой структуры реального дна акватории было проведено сравнение импульсного экспериментального отклика волновода с модельными расчётами волноводов с несколькими вариантами состава дна. Показана возможность уточнения оценок геологических параметров осадочных слоев конкретной акватории при низкочастотном зондировании дна с использованием макета указанного примено-излучающего комплекса.

Ключевые слова: низкочастотный гидроакустический излучатель, приемная антенна, морское дно, эксперимент, геофизика.

Testing of a prototype of a receiving-emitting complex for low-frequency bottom sounding in a river reservoir

A.I. Khil'ko[1,a], V.I. Kalinina[1,b], A.A. Lisin[1,c], A.A. Antonov[1,d], I.A. Kapustin[1,e], A.V. Lebedev[1,f]

[1] *Federal Research Center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences (IAP RAS), 46 Ul'yanov Street, Nizhny Novgorod, 603950, Russia*

E-mail: [a] a.khil@ipfran.ru, [b] v.kalinina@ipfran.ru, [c] a.lisin@ipfran.ru, [d] andendton@ipfran.ru, [e] kia@ipfran.ru, [f] swan@ipfran.ru

Abstract: The paper presents the results of an experiment using a new complex for seismoacoustic bottom sounding and solving geophysical problems of propagation of complex modulated signals in the bottom. The prototype includes: a new longitudinally bending low-frequency low-power sonar source and a 24-channel seismic receiving antenna. The complex for low-frequency seismic and acoustic bottom sounding was tested in the shallow channel of the Volga River in the Gorky reservoir. The source used is capable of emitting complex acoustic pulses in the frequency range from 80 to 2000 Hz. The amplitude-frequency characteristics of the source were measured, as well as a series of experiments on the generation of LFM pulses in the operating band of the radiator. Experiments have shown that this acoustic source has a pronounced resonance at a frequency of 126 Hz, which is a unique indicator for a source with a relatively small size of 70 cm. To analyze and evaluate the parameters of the composite layered structure of the real bottom of the water area, the pulsed experimental response of the waveguide was compared with model calculations of waveguides with several variants of the bottom composition. It is shown that it is possible to refine estimates of the geological parameters of sedimentary layers of a particular water area with low-frequency bottom sounding using a prototype of the specified receiving-emitting complex.

Keywords: low-frequency sonar source, receiving antenna, sea bottom, experiment, geophysics.

PACS: 47.35.Rs, 43.20.El, 43.30.+m, 43.60.−c, 89.20.Bb

Введение

Для современных гидроакустических методов важным аспектом является баланс между дальностью проникновения сигнала и разрешающей способностью измерений в осадочных слоях морского дна. В традиционных высокочастотных гидролокационных системах повышенная частота приводит к более высокому затуханию, что ограничивает глубину и дальность исследования, особенно в условиях сложного рельефа и неоднородной звуковой среды морской толщи. В то же время низкочастотные источники обладают существенно меньшим затуханием в воде и в донных слоях, что делает их более подходящими

для задачи исследования глубоких геологических структур и профилей на больших расстояниях. Целью данной работы являлось испытание макета нового приемно-излучающего комплекса для исследования структуры принятых сейсмоакустических сигналов, распространяющихся на мелководье, с применением нового низкочастотного широкополосного гидроакустического излучателя.

1 Состав и постановка приемно-излучающего комплекса

В состав макета входят новый продольно-изгибный низкочастотный маломощный гидроакустический излучатель (рис. 1, а), изготовленный по технологии, разрабатываемой в ИПФ РАН [1], блок электроники управления излучателем (блок питания, усилитель, повышающий трансформатор) и приемная антенна, состоящая из 24 независимых цифровых гидрофонов с возможностью буксировки (рис. 1, б).



а



б

Рис. 1 – Элементы измерительного комплекса: *а* – низкочастотный гидроакустический излучатель, *б* – приемная антенна.

Комплекс для низкочастотного зондирования дна испытывался в мелководном русле реки Волга в Горьковском море с глубинами порядка 6–9 м. Для поставновки акустического источника, состоящего из излучателя и бортового блока питания и управления, использовался катер. Излучатель имел массу на воздухе 55 кг и габариты 0.7 × 0.25 метра. На излучатель подавалось напряжение в 400 В, при этом акустическое давление составляло 2 кПа, а мощность излучения – 33 Вт. Излучатель погружался в воду на глубину 5 м. Со второго судна осуществлялось погружение сейсмоакустической антенны в горизонтальном положении и запись принимаемых ею сигналов. Расстояния между суднами менялись от 50 до 1400 м, излучение и прием проводились в стационарной постановке. Используемый излучатель способен возбуждать сложные акустические импульсы в интервале частот от 80 до 2000 Гц. Предварительные измерения в лабораторном бассейне показали наличие резонансного пика в

диапазоне от 100 до 150 Гц, вследствие чего было предложено проводить измерения при излучении ЛЧМ-сигналов от 80 до 400 Гц.

2 Измерение АЧХ излучателя и анализ структуры принятых сигналов

Измерения амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) излучателя проводились с использованием контрольного гидрофона на расстоянии 1 м от излучателя. Измеренная АЧХ излучателя в диапазоне от 80 до 400 Гц показана на рис. 2, *а*. Данный акустический источник имеет выраженный резонанс на частоте 126 Гц. Низкие частоты, как известно, затухают слабо по сравнению с высокими, поглощение на 100–150 Гц составляет примерно 0,01 дБ/км, и, в зависимости от параметров волновода и мощности источника, могут распространяться на мелководье на расстояния до десятков километров. Уникальность данного излучателя состоит в возможности воспроизведения такой резонансной частоты при его сравнительно небольших размерах в 70 см.

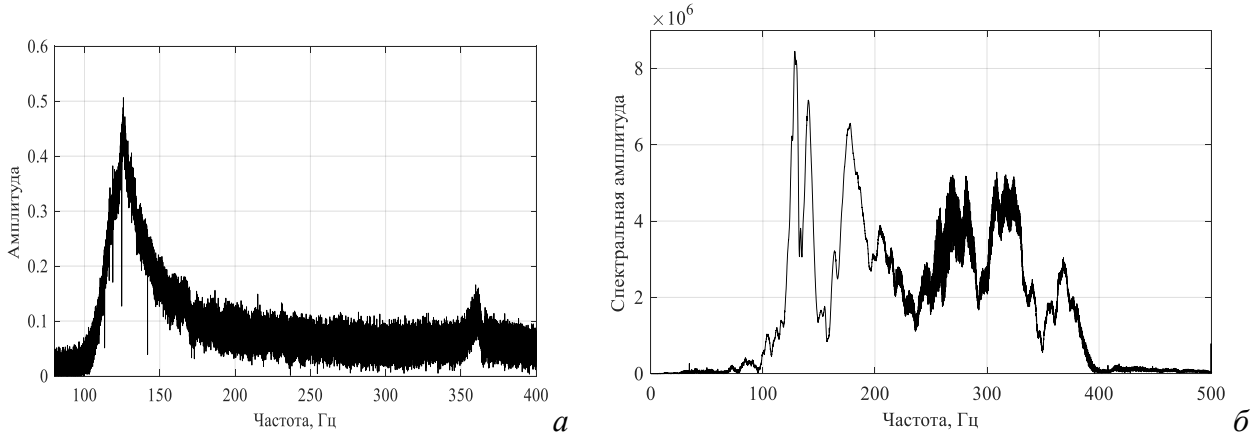


Рис. 2 — Измеренная АЧХ излучателя в заданном частотном диапазоне – *а*; спектр принятого сигнала на 1 гидрофоне на расстоянии 50 м от излучателя – *б*.

В работе были исследованы принятые сигналы при излучении ЛЧМ импульсов в диапазоне от 80 до 400 Гц, длительностью 10 с на нескольких расстояниях между излучателем и приемной антенной. Для ослабления шумов была выполнена частотная фильтрация принятых сигналов в полосе излучения. На рис. 2, *б* показан спектр принятого сигнала на 1 гидрофоне на расстоянии 50 м между излучателем и приемной антенной. Сравнение спектрограмм на нескольких расстояниях от излучателя показывает, как падает интенсивность принимаемого полезного сигнала при увеличении трассы распространения сигналов на фоне аддитивных шумов акватории.

В результате согласованной обработки, когерентного накопления сигналов по гидрофонам антенны и межимпульсного накопления, были получены отклики согласованного фильтра принятых сигналов. Большой отклик прямого сигнала падает, в то время как

возрастают приходящие раньше, вследствие большей скорости звука в донных породах, сигналы, отраженные от осадочных слоев. Эксперимент показал, что используемый частотный диапазон при данной мощности излучения нового малогабаритного источника эффективен при распространении сигналов на расстоянии до 1400 м.

3 Сравнение измеренных данных и расчетных моделей

Исследования структуры дна в акватории, где был проведен эксперимент, проводились с помощью новой разрабатываемой модели расчета принятого сигнала методом полного поля [2]. Математическая модель включает в себя модель точечного источника, помещённого в волновод с подстилающим полупространством в виде упругого дна. Источником генерируются ЛЧМ–сигналы в заданной частотной полосе, распространяются в водной толще, отражаются от поверхности воды и дна и принимаются точечным приемником на некотором расстоянии. Были проведены предварительные расчеты импульсного отклика волновода с несколькими вариантами состава дна. Были использованы данные, полученные в эксперименте при расстоянии 50 м между излучателем и приемной антенной, усредненные на одном из гидрофонов антенны. На рис. 3 *а, б* черной линией представлен нормированный импульсный отклик, полученный из обработки измеренных сигналов.

Первой расчетной моделью дна была принята модель песчаного дна с параметрами: плотностью 2000 кг/м^3, продольной скоростью 1700 м/с, поперечной скоростью 500 м/с. Нормированный импульсный отклик такой модели с равномерной АЧХ излучателя приведен голубым цветом на рис. 3 *а,* б. Сравнение длительности измеренного и модельного импульсного откликов показывает, что короткий отклик отвечает узкому диапазону углов падения на дно, при которых коэффициент отражения близок к единице. В другой расчетной модели №2 дно представлено в виде гранитного полупространства (красная линия на рис. 3 *а*) с параметрами: плотностью 2700 кг/м^3, продольной скоростью 6000 м/с, поперечной скоростью 3600 м/с. Импульсный отклик модели №2 с равномерной АЧХ источника является более растянутым по времени, чем для модели №1 песчаного дна однако все равно оказывается более коротким, чем в измерениях. Такая ситуация возможна, если на экспериментальные данные существенное влияние оказывают резонансные свойства источника.

Для оценки влияния резонанса излучателя был рассчитан импульсный отклик для параметров из модели песчаного дна №1, но с учетом резонансной частоты источника в 126 Гц (рис. 2, *а*). График такой модели показан фиолетовой линией на рис. 3 *б*. В результате моделирования были сделаны выводы о том, что дно в районе измерений более жесткое, чем песчаное, а наличие резонансных частот существенно влияет на расширение импульсного отклика по времени.

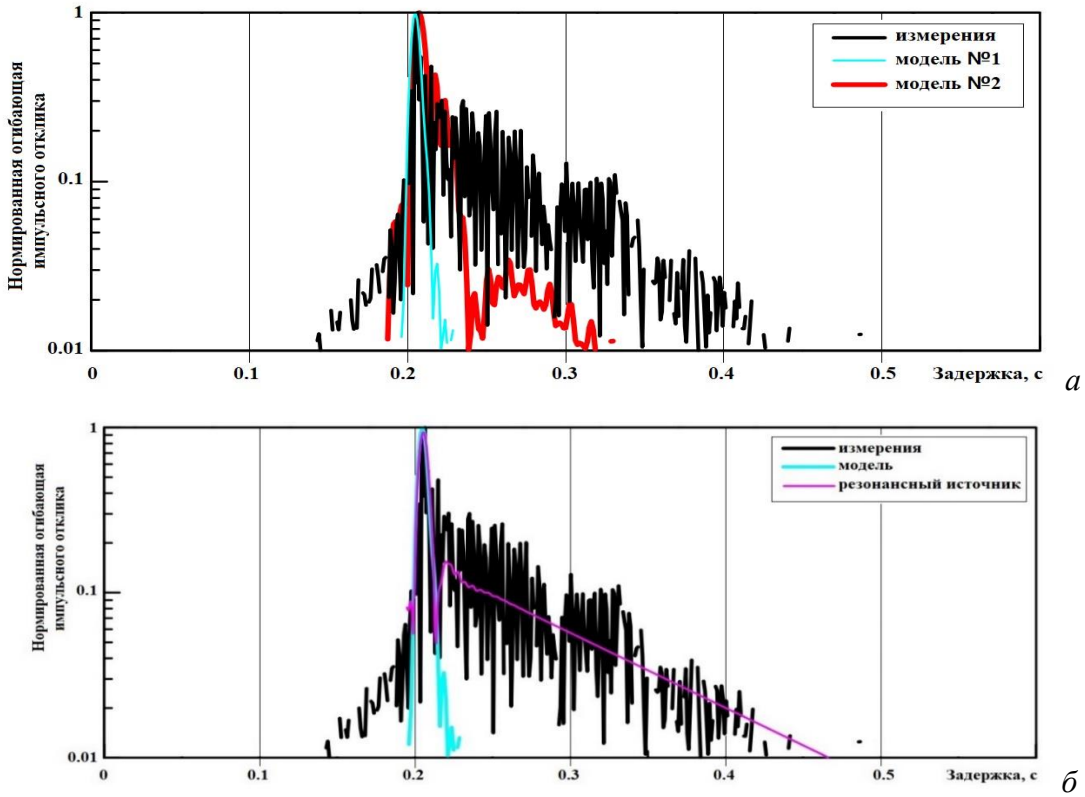


Рис. 3 – Сравнение нормированных импульсных откликов на дистанции 50 м

Заключение

В испытаниях в мелководном районе был апробирован макет комплекса для низкочастотного зондирования дна, включающий новый низкочастотный маломощный малогабаритный излучатель и сейсмоакустическую приемную антенну, и проведены исследования структуры принятых сигналов. Показано, что сравнение полученных экспериментальных данных с расчетной численной моделью отражения сложномодулированных сигналов от слоистого дна способствует уточнению оценок геологических параметров осадочных слоев в конкретной акватории.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН по теме № FFUF-2024-0035.

Список литературы

1. *Хилько А.И., Сидоров К.А., Капустин И.А., Некрасов В.Н., Антонов А.А., Калинина В.И., Коновалов В.Е., Лисин А.А., Норкин М.С., Корнев А.И. и др.* Экспериментальная оценка параметров гидроакустического продольно-изгибного излучателя // Успехи Прикладной Физики. 2025. **13**. №1. С. 70–77. DOI: 10.51368/2307-4469-2025-13-1-70-77.
2. *Бреховских Л.М.* Волны в слоистых средах. Наука. М., 1973.
3. *Хаттон Л., Уэрдингтон М., Мейкин Дж.* Обработка сейсмических данных. Теория и практика: Перевод с англ. А.Л. Малкина. Мир. М., 1989.

УДК: 519.63. DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39587

Численный расчёт трёхмерной морской сейсморазведки с ледовой платформы и в безлёдный период с использованием высокопроизводительных вычислений

Е.К. Гусева[1,2,a], А.В. Шевченко[1], В.И. Голубев[1,2]

[1] *Московский физико-технический институт, 141701, Московская область, г. Долгопрудный.*
[2] *НИЦ «Курчатовский институт» - НИИСИ, 117218, г. Москва.*
E-mail: [a]guseva.ek@phystech.edu

Аннотация: Трёхмерные расчёты волновых процессов в сложных геологических средах требуют значительных вычислительных ресурсов, что обуславливает необходимость использования высокопроизводительных вычислительных систем. Данная технология позволяет исследовать различные особенности геологических разрезов на труднодоступных территориях, таких как богатый природными ресурсами Арктический регион. В связи с этим целью настоящей работы является численное моделирование морской сейсморазведки в акватории Арктики в безлёдный период и при наличии ледовых полей, которые могут использоваться в качестве платформы для проведения сейсморазведочных работ. На основе сравнения волновых процессов в присутствии льда и без него оценивается влияние тонкого слоя льда на результаты измерений. Модель разреза включает слоистый многолетнемёрзлый грунт с нефтяным месторождением в форме антиклинали, слои воды, морского дна и ледовой платформы, на поверхности которых размещались источники и приёмники сигнала. Путём многовариантного расчёта определяется оптимальная конфигурация расстановки источников и приёмников для обеих постановок задачи. Для моделирования используется система уравнений линейной теории упругости, решаемая с помощью сеточно-характеристического метода и технологии MPI для параллельных вычислений. Полученные результаты могут применяться для улучшения интерпретации полевых сейсмических данных, а также на этапе планирования полевых работ.

Ключевые слова: численное моделирование, морская сейсморазведка, Арктический регион, сеточно-характеристический метод, высокопроизводительные вычисления.

Numerical modeling of three-dimensional marine seismic exploration during ice and ice-free periods using the HPC system

E.K. Guseva[1,2,a], A. V. Shevchenko[1], V.I. Golubev[1,2]

[1] *Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia.*
[2] *NRC «Kurchatov Institute» - SRISA, Moscow 117218, Russia.*
E-mail: [a]guseva.ek@phystech.edu

Abstract: Conduction of the three-dimensional simulations of wave processes in complex geological

formations has high requirements of computational resources, which incentivizes the usage of the high-performance computing systems to accelerate the calculations. This technology allows for the investigation of the different features of the strata in the difficult-to-access regions, such as the rich with natural resources Arctic. Therefore, the goal of the present work is numerical modeling of the marine seismic exploration in the offshore areas of the region during ice and ice-free periods. Here ice can be used as a platform for seismic prospecting. Based on the comparison of wave processes with and without ice, we analyze its influence on the measurements. For our study we constructed the model of the formation, which included layered permafrost with an oil anticlinal trap, seabed, water and ice layers with seismic sources and receivers. By conducting multivariant simulations we determine the most optimal configuration of their positions. The strata are described with the isotropic linear elasticity model solved using the grid-characteristic method and MPI for parallelization. Obtained results can be applied to the interpretation of real data and during the field work planning.

Keywords: numerical modeling, marine seismic exploration, Arctic region, grid-characteristic method, HPC systems.

PACS: 02.30.Jr

Введение

Численное моделирование активно используется для решения индустриальных задач и изучения влияния различных факторов на состояние динамических систем, что особенно актуально для освоения труднодоступных территорий, таких как богатый полезными ископаемыми Арктический регион. Так с помощью многовариантных расчётов исследуются различные волновые процессы, которые могут возникать при проведении сейсморазведки, и оценивать влияние особенностей региона на результаты измерений. Таким образом, в настоящей работе проводится расчёт трёхмерной морской сейсморазведки в лёдный и безлёдный периоды для изучения специфики сейсморазведки при наличии ледовых полей, которые можно использовать в качестве плавучих нефтяных платформ путём увеличения их толщины намораживанием льда [1]. Объектом исследования является месторождение нефти в форме антиклинали, расположенное в слоистом многолетнемёрзлом грунте.

Трёхмерная полноволновая задача решается с помощью сеточно-характеристического метода, позволяющего с достаточной точностью воспроизвести волновые процессы в объектах со сложной геометрией и большим числом отражающих границ [2]. Возникающие вычислительные сложности требуют применения технологий параллельных вычислений и использования высокопроизводительных систем. В связи с этим в настоящей работе все расчёты выполнялись на кластере К-60 Суперкомпьютерного Центра коллективного пользования ИПМ им. М. В. Келдыша РАН с использованием программного комплекса

RECT, поддерживающего параллелизацию в рамках MPI. Программа разработана на C++ на кафедре информатики и вычислительной математики МФТИ. Для расчёта было доступно 9 узлов кластера, на каждом из которых было 28 ядер (252 процесса).

1 Постановка задачи

Для разреза в Арктическом регионе характерны неоднородность и наличие пластов многолетнемёрзлого грунта. Для корректного описания основных особенностей морской сейсморазведки в этих условиях была построена трёхмерная модель акватории региона (500×500×663 м^3 на рис. 1), включающая в себя слои льда (мощностью 3-8 м, 0) и воды (1, 7), а также слоистый геологический массив (2-8). Месторождение рассматривалось в виде антиклинали (5-7), в которой нефть покоится (6) на поверхности воды (7) и сдерживается тонкими пластами глинистой породы (5). Для генерации существенно криволинейных поверхностей слоёв на языке Python был написан скрипт, использующий функцию perlin_noise.PerlinNoise. Геометрия ледового поля строилась на основе индустриальной технологии построения ледяных платформ путём намораживания льда [1]. Для полноценного сравнения были проведены расчёты без учёта льда для анализа сейсморазведки в безлёдный период и без слоя нефти для определения индикаторов наличия нефти в антиклинали.

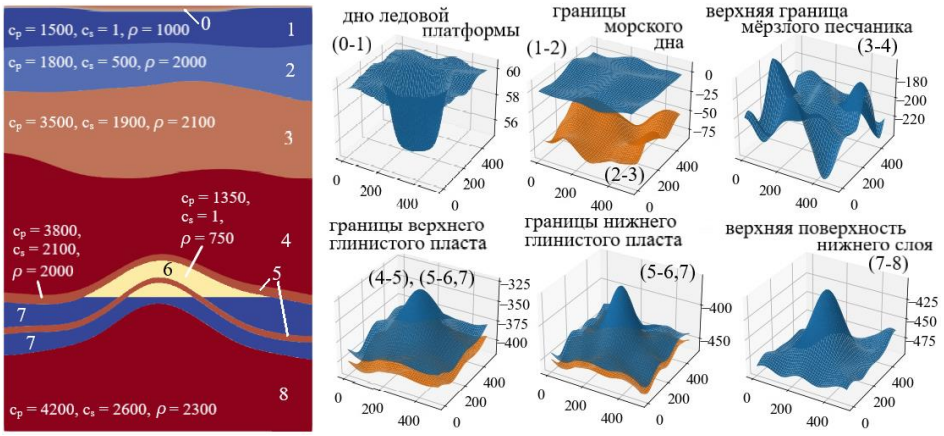


Рис. 1. Двумерный разрез расчётной области и криволинейные поверхности контакта между подобластями. Упругие параметры слоёв указаны в системе СИ, координаты даны в метрах.

Все слои в расчётной области описывались с помощью системы изотропной линейной теории упругости, для решения которой использовались сеточно-характеристический метод [2] и схема Русанова 3 порядка аппроксимации, которая монотонизировалась сеточно-характеристическим критерием монотонности [3]. Скорости порождённых продольных c_p и поперечных c_s волн, а также плотность среды ρ указаны на рис. 1. Дополнительно учитывалась зависимость параметров льда (0 на рис. 1) от температуры T, °C, согласно характерному для многолетнего льда профилю [4]. Их значения оценивались по формуле стандарта ИСО 19906, $E = 9.21\ (1 - 0.00146\ T)\ (1 - v_b^{0.5})^4$, с постоянным коэффициентом Пуассона $\mu = 0.295$ и объёмной долей рассола, рассчитанной по формуле Франкенштейна-Гарнера: $v_b = S\ (49.185 / |T| + 0.532)$

‰. Солёность определялась по глубине льда в каждой точке платформы согласно эмпирической формуле [5]: $S(h) = (4.606 + 91.603 / h_{max}) (-0.5244 h^2 + 1.835 h + 0.262)$ ‰. Плотность оценивалась как $\rho = 917 / (1 + 0.000165 T)$ кг/м^3.

Для экономии времени и вычислительных ресурсов вычисления проводились сквозным счётом с помощью единой прямоугольной сетки, в каждом узле которой задавались упругие параметры, соответствующие подобластям расчётной области. Вдоль вертикального направления использовался пространственный шаг, равный 0.25 м, вдоль горизонтальных – 1 м. Расчёты длились до 0.5 с с временным шагом в 0.05 мс, выбранным для выполнения условия устойчивости расчётов Куранта. Дневная поверхность считалась свободной, боковые границы расчётной области задавались поглощающими. Источник сигнала в виде вейвлета Рикера с частотой 30 Гц, достаточной для малоглубинной сейсморазведки, помещался в центре области на верхней поверхности и на морском дне. Вдоль этих поверхностей также ставились приёмники сигнала через 1 м вдоль направления осей ZX и ZY.

2 Результаты расчётов

Полученные в результате расчётов волновые картины на рис. 2 показывают характерные свойства рассматриваемых постановок. Сравнение результатов в лёдный и безлёдный периоды показывает доминирующую роль высокоамплитудных кратных волн во льду в сигнале, поступающем на приёмники на дневной поверхности, заглушающих отклик от антиклинали более низкой амплитуды. Помещение источника на морское дно позволяет уменьшить число переотражений, однако и в этом случае наблюдаются дополнительные отражения исходного волнового фронта (отмечены стрелками). Тем не менее в обеих постановках первая падающая продольная волна, формирующая основной оклик от месторождения, распространяется одинаково. Дополнительно на результаты сейсморазведки оказывают влияние формирующиеся волны Рэлея на поверхности льда (в безлёдный период не появляются) и волны Стоунли (по-другому называемые волнами Шольте-Гоголадзе) на контакте между водой и морским дном.

Высокоамплитудные волновые явления в приповерхностных слоях скрывают значительную часть отклика от антиклинали, что затрудняет определение индикаторов наличия нефти. Наиболее заметные различия между постановками с нефтью и без неё прослеживаются в волне, прошедшей через всю антиклиналь и отражённой от её нижней границы (отмечены стрелками на рис. 3). Скорость волн, прошедших через водный слой, оказывается немного больше, что можно выделить в качестве отличительной особенности данного случая. Для постановок с нефтью также характерны дополнительные переотражения на границах между нефтью и водой, однако они имеют небольшую амплитуду из-за малой разницы в акустических импедансах между этими слоями.

На рис. 3 представлены сейсмограммы, синтезированные на основе сигнала, пришедшего на

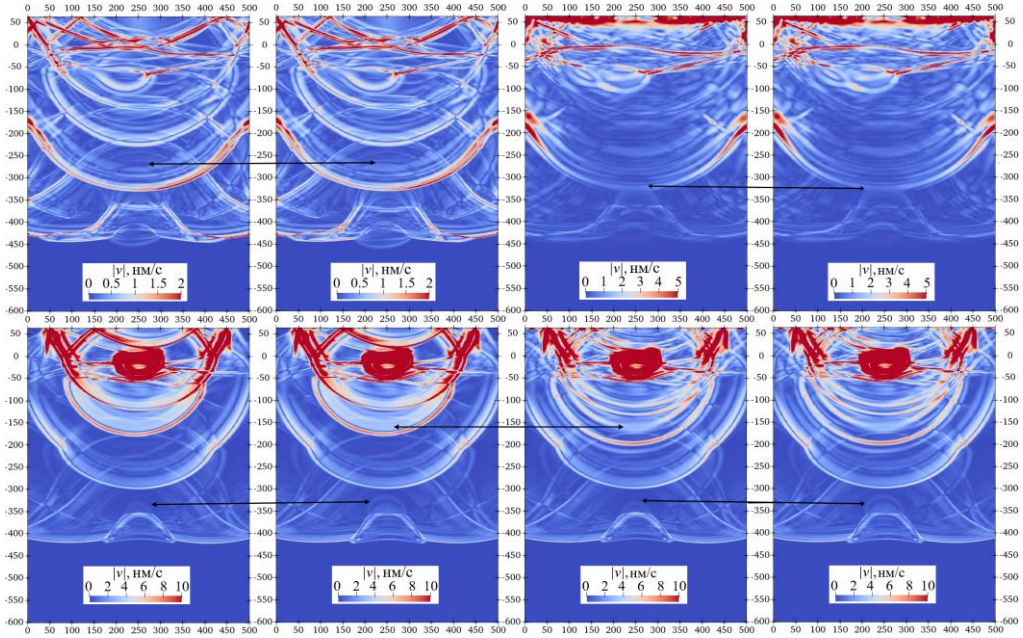


Рис. 2. Волновые картины в разрезе ZX с источником во льду (0.2 с, верхний ряд) и на морском дне (0.15 с, нижний ряд). Правый столбец – рассчитанный модуль разности между двумя средними столбцами (постановки с нефтью и без неё).

приёмники на дневной поверхности и на морском дне. Согласно полученным результатам, наибольшие различия между сейсморазведкой в лёдный и безлёдный период наблюдаются при помещении источников и приёмников на дневную поверхность, из-за чего в первом случае в сигнале доминируют поверхностные волны Рэлея и кратные волны, что делает эту конфигурацию наименее предпочтительной для измерений. Во втором случае вода поглощает часть сигнала, но тем не менее отклик от нефти можно идентифицировать, наложив сейсмограммы с нефтью и без неё друг на друга.

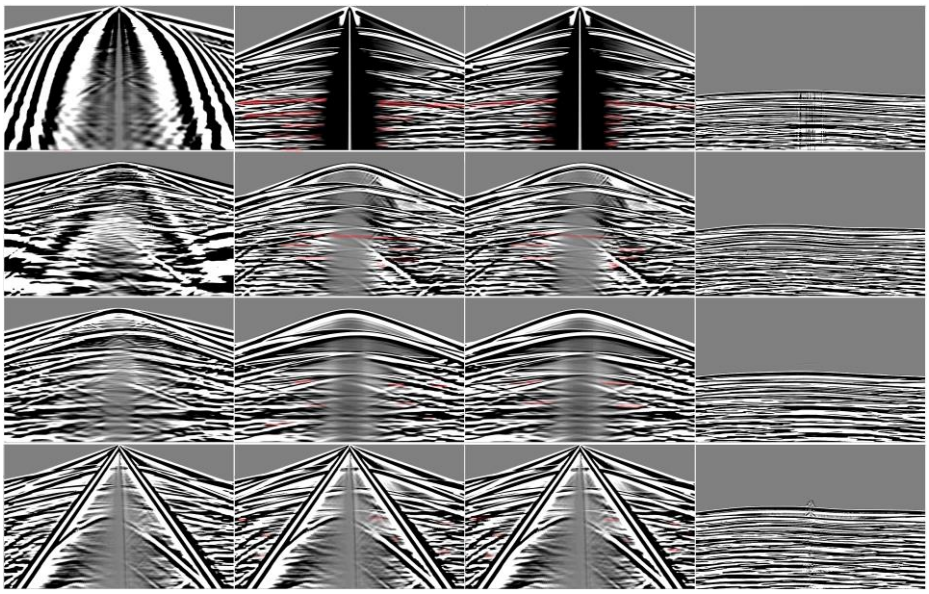


Рис. 3. Сейсмограммы вертикальной компоненты скорости в плоскости ZX. Первый столбец – постановка со льдом, остальные – без него. Второй столбец – постановка с нефтью, третий – без неё, четвёртый – вычисленная разница между вторым и третьим столбцами. Верхние два ряда – источник во льду, нижние – на морском дне. Первый и третий ряд – приёмники на льду, второй и четвёртый – на дне. Цветом дополнительно выделена разница между постановками с нефтью и без неё.

Наименьшие отличия между постановками наблюдаются при размещении источника и

приёмников на морском дне. Таким образом удаётся почти полностью нивелировать влияние кратных волн во льду. Однако в данном случае сильнее проявляются поверхностные волны Стоунли (след от которых заметен и в случае источника на поверхности), из-за чего затрудняется идентификация отклика от нефти. В связи с этим может быть предпочтительнее помещение приёмников на дневную поверхность, несмотря на небольшое зашумление сигнала кратными волнами во льду и поглощение части сигнала в воде. Тем не менее во всех случаях на изначальных сейсмограммах затруднена идентификация отражения от месторождения, что подтверждает необходимость обработки сигнала с учётом оценки времени прихода волн и возможного запаздывания отклика от нефти по сравнению с откликом от полностью заполненной водой антиклинали.

Заключение

В результате настоящей работы на высокопроизводительной системе были решены прямые задачи трёхмерной морской сейсморазведки в акватории Арктического региона, содержащей месторождение в виде антиклинали. Показаны основные особенности протекания волновых процессов в условиях наличия льда, включая образование поверхностных и кратных волн, значительно усложняющих интерпретацию данных измерений. Отмечены свойства отклика от антиклинали при наличии нефти в ловушке. Определена наиболее оптимальная конфигурация положения источников и приёмников сигнала для анализа измерений. Полученные результаты могут использоваться при обработке натурных данных и для решения обратных задач. Работа выполнена в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт» – НИИСИ по теме № FNEF-2024-0002 «Математическое моделирование многомасштабных динамических процессов и системы виртуального окружения» (1023032900401-5-1.2.1).

Список литературы

1. *Семенов Д. А., Калошина С. В.* Инновационные технологии строительства искусственных островов // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2016. **7**, № 4. С. 80.
2. *Петров И. Б.* Сеточно-характеристические методы. 55 лет разработки и решения сложных динамических задач // СМІТ. 2023. **7**, № 1. С. 6.
3. *Guseva E. K., Golubev V. I., Petrov I. B.* Quasi-Monotonic and Hybrid Grid-Characteristic Schemes for Hyperbolic Equations // Lobachevskii J Math. 2023. **44**, P. 296.
4. *Богородский В. В., Гусев А. В., Доронин Ю. П., Кузнецова Л. Н., Шифрин К. С.* Физика океана. Гидрометеоиздат. Л., 1978.
5. Сборник нормативно-методических материалов. Книга двадцать пятая. НД № 2-139902-030. Российский регистр судоходства. СПб., 2017.

УДК: 552.08:53; 552.54 DOI: 10.34756/GEOS.2026.17.39588

Акустическая реконструкция внутренней структуры карбонатной породы

А.В. Лебедев

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН,

Нижний Новгород, Ульянова, 46

E-mail:swan@ipfran.ru

На основе акустических данных построена модель устройства пространства пор в карбонатной горной породе. Показано, что значительная часть пространства пор заполнено микроскопическими трещинами с различными отношениями полуосей моделирующих их сплюснутых эллипсоидов. Это объясняет наблюдавшиеся нелинейные акустические эффекты в карбонатной породе. Сравнение с данными стандартного геологического анализа и данными из литературных источников показало удовлетворительное согласие. Полученные результаты имеют значение для задач материаловедения структурно-неоднородных сред.

Ключевые слова: акустика гетерогенных сред, акустическая диагностика трещин

PACS: 62.20.mt; 91.60.Lj.−c

Введение

Горные породы представляют собой особый класс гетерогенных сред с широким спектром пространственных масштабов неоднородностей. Интерес к карбонатным горным породам вызван несколькими обстоятельствами. Во-первых, данный тип горных пород занимает второе место по распространенности после глин в осадочной оболочке Земли, составляя около 20% от общего объема осадков. Во-вторых, данный тип горных пород образуют коллекторы углеводородного сырья (газ и нефть), которые с течением времени играют все большую роль в сравнении с традиционными коллекторами из песчаников. При рассмотрении вопроса добычи углеводородов остро стоит вопрос о связи пористости и проницаемости с величинами измеряемых дистанционно скоростей объемных волн. Для решения практических задач часто используются эмпирические соотношения, которые удовлетворительно описывают силикатные породы (песчаники), но подобное описание карбонатных пород оказывается практически невозможным из-за сложного минералогического состава и геометрии пор. В результате пористость и проницаемость определяются со значительной погрешностью, затрудняя оценку перспективности коллекторов дистанционными акустическими методами.

Целью настоящего исследования является использование качественных акустических данных [1] для установления геометрии и строения микроскопических пор и трещин. Отличительной особенностью работы [1] было то, что наряду с акустическими измерениями выполнялся стандартный геологический анализ материала. На основе этих данных мы намерены оценить объемное содержание трещин в пространстве пор и сделать выводы относительно поверхностей этих трещин. На наш взгляд, представленное короткое исследование демонстрирует возможности акустической реконструкции строения материала со сложной внутренней структурой, что представляет интерес, в том числе, для задач материаловедения гетерогенных материалов.

Реконструкция внутреннего строения карбонатной породы

Образец представляет собой светло-серый сильно пористый известковистый доломит. Известковистый доломит по классификации карбонатных пород, представленной в [2], представляет собой смесь из доломита и кальцита, где содержание доломита составляет 75–95%. Внутреннее строение отвечает мелкозернистой мозаичной структуре из зерен доломита с характерным размером 0.01–0.02 мм. Порода является неравномерно пористой с участками, достигающими 30–40% площади шлифа. Это позволяет предположить, что внутренняя структура содержит разнообразные каверны, полости и т.п. Поры имеют неправильную форму от округлой до вытянутой. По результатам минералогического анализа порода имеет включения в виде слюды, что указывает на существование тонких трещин.

В результате выполненного стандартного химического анализа было установлено, что материал содержит массовые доли основных составляющих CO_2 –46.07%, CaO–31.14%, MgO –19.39%, SiO_2–1.52%, SO_3–0.19%, а также элементы, входящие в состав слюд и глин (Fe_2O_3–0.18%, Al_2O_3–0.28%, Na_2O–0.12% и ряд других). Для пересчета к объемным концентрациям необходимо использовать атомный вес химических составляющих. Опуская несложные вычисления, можно установить, что вариации плотности скелета за счет материалов, входящих в состав глин и слюд, могут составить ±0.01 г/см^3. Основные составляющие могут быть объединены в минералы: (1) кальцит $CaCO_3$, (2) доломит $CaMg(CO_3)_2$, (3) гипс $CaSO_4$ и (4) двуокись кремния SiO_2. Эти составляющие являются типичными для карбонатных пород [2]. Объемное содержание ϕ составляющих, их плотность ρ, модули объемной K и сдвиговой G жесткости приведены в таблице 1. Плотности и модули жесткости заданы по [3]. Вычисленная по данным таблицы 1

Таблица 1 – Объемное содержание, плотность и модули упругости

материал	$CaMg(CO_3)_2$	$CaCO_3$	$CaSO_4$	SiO_2
ϕ, %	82.95	12.3	0.41	4.34
ρ, г/см^3	2.87	2.71	2.32	2.204
K, ГПа	95	73.3	42.5	36.5
G, ГПа	46	32	15.7	31.2

плотность составляет 2.82 г/см^3, что согласуется с измеренной в [1] величиной плотности сухого скелета ρ_g=2.81±0.01 г/см^3.

Модули упругости смеси материалов в объемных пропорциях (таблица 1) могут быть вычислены с использованием самосогласованного приближения теории смесей. Формулы хорошо известны [4], и поэтому не приводятся. Решение соответствующих нелинейных уравнений осуществлялось с помощью стандартных прикладных программ из пакета IMSL. Модули K и G для скелета составят 87.8 и 43.1 ГПа, для материала с измеренной в [1] пористостью 18.2% и круглыми порами 50.0 и 27.8 ГПа, измеренные величины модулей упругости составляют 17.97±0.84 и 17.9±0.3 ГПа [1]. Измеренные величины оказываются заметно меньше вычисленных, что указывает на наличие податливых включений в виде трещин. Нетрудно убедиться, что при замене пространства пор, моделируемого шарами с нулевыми модулями упругости заполнения, на пустоты в виде дисков, что моделирует бесконечно узкие трещины, вычисленные модули упругости оказываются практически нулевыми. Значения ограничены величинами модулей упругости заполнения дисков. Это указывает на наличие трещин. На наличие трещин также указывает выполненный минералогический анализ, по результатам которого порода имеет включения в виде слюды.

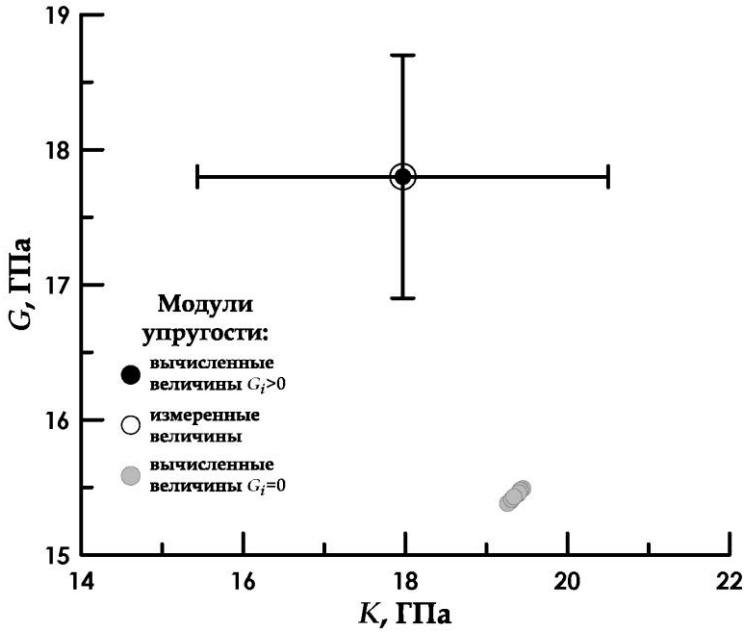


Рисунок 1 – Измеренные и вычисленные модули упругости

Результат поиска концентрации трещин и модуля сдвига их заполнения представлен на рисунке 1. Эффективные модули упругости среды с трещинами с отношением полуосей: α=0.0001, 0.001, 0.01 и имеющими ненулевое значение модуля сдвига заполняющего их материала G_i>0, оказываются в идеальном согласии с измеренными значениями. Нулевые модули упругости заполнения трещин не приводят к согласию с результатами измерений. Основной вклад в вычисленные модули упругости оказывают тонкие (узкие) трещины с малыми значениями α≤0.001. Пористость, не связанная с трещинами, составляет 13%. Суммарная трещиноватость деформируемых дефектов составляет в среднем 38.3%, т.е. величину, отвечающую отсутствию разрушения материала. В часто цитируемой работе [5] указывается на важность цементирующих составляющих, которые определяют акустические свойства карбонатных пород. Такие составляющие представляют собой микроскопические

зерна микронного размера, которые могут приводить к защемлению краев трещин при сдвиговых деформациях. Таким образом, предположение о наличии на поверхностях трещин неровностей, которые ограничивают сдвиговые деформации трещин, что моделируется конечным модулем сдвига заполнения трещин, является обоснованным.

Заключение

В результате выполненного исследования, построена модель эффективной среды и показана высокая трещиноватость материала, что объясняет наблюдавшиеся ранее нелинейные эффекты. Сделанные предположения согласуются с данными независимых исследований, а также результатами геологического анализа горной породы. Полученные результаты представляют интерес для задач материаловедения при оценке объемного содержания микроскопических трещин и их свойств.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №25-22-00617.

Список литературы

1. *Averbakh V.S., Bredikhin V.V., Lebedev A.V., Manakov S.A.* // Acoust. Phys. 2010. **S56**. P. 794.
2. *Фролов В.Т.* Литология. Т.2. Из-во МГУ, 1993. 432с.
3. *Bass J.D.* A handbook of physical constants T.J. Ahrens ed. Vol. **2**. AGU. Washington D.C. 1995. P. 45.
4. *Berryman J.G.* A handbook of physical constants T.J. Ahrens ed. Vol. **3**. AGU. Washington D.C. 1995. P. 205.
5. *Vanorio T., Mavko G.* // Geophysics. 2011. **76**. № 4. P. E105.

Acoustic reconstruction of a carbonate rock interior

A.V. Lebedev

Institute of Applied Physics of the RAS. N. Novgorod 603950, Russia.

E-mail: swan@ipfran.ru

A model of the pore space structure in carbonate rock was constructed using acoustic data. It was shown that a significant portion of the pore space is filled with microscopic fractures with varying semi-axis ratios of the oblate ellipsoids that model them. This explains the observed nonlinear acoustic effects in carbonate rock. Comparison with standard geological analysis and literature data showed satisfactory agreement. The results obtained are relevant for materials science problems in structurally heterogeneous media.

Keywords: acoustics of heterogeneous media, acoustic diagnostics of cracks

PACS: 62.20.mt; 91.60.Lj.−c

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39589

Акустическая эмиссия при подготовке динамического проскальзывания по гетерогенному разлому в крупномасштабном эксперименте

Морозова К.Г., Остапчук А.А., Павлов Д.В

Институт динамики геосфер имени академика М.А.Садовского РАН, г. Москва

Тел.: +7(916)173-7683; E-mail: morozova.kg@idg.ras.ru

Ключевым фактором, контролирующим процесс проскальзывания по разлому, является пространственная неоднородность фрикционных свойств вдоль его простирания. Невозможность прямого наблюдения за разломами на большой глубине создаёт необходимость в разработке специальных методов диагностики. Лабораторное моделирование позволяет установить общие закономерности изменения макроскопических параметров, контролирующих деформационный процесс.

В работе представлены результаты экспериментов на крупномасштабной установке RAMA, созданной в ИДГ РАН для исследования процесса сдвигового деформирования контакта блоков горной породы. Моделью разлома служил нагруженный контакт двух блоков диабаза размером 750×120 мм², что позволяет сначала воссоздать гетерогенность свойств модельного разлома, а затем изучить пространственно-временные закономерности развития процесса скольжения по этому разлому. На интерфейсе разлома были сформированы зоны, которые обладают повышенной прочностью со свойством скоростного разупрочнения – аналоги зон асперити в модели Канамори. Разрушение асперити сопровождалось излучением большого количества акустических импульсов. Задача локализации зарегистрированных импульсов акустической эмиссии выполнялась методами машинного обучения. В результате кластеризации импульсов акустической эмиссии удалось выявить внутреннюю структуру разломной зоны.

Ключевые слова: тектонический разлом, асперити, акустическая эмиссия, лабораторный эксперимент

Мультимасштабный энтропийный анализ данных сейсмоакустического обследования обделки тоннелей

Лозовский И.Н.[1)], Чуркин А.А.[2),3)], Жостков Р.А.[3)]

[1)] Центр геоэлектромагнитных исследований – филиал Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Троицк, г. Москва, Россия;

[2)] НИИОСП им. Н.М. Герсеванова АО «НИЦ «Строительство», г. Москва, Россия;

[3)] Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия.

Тел.: +7(495)840-7062; Факс: +7(495)851-0917; E-mail: i.n.lozovsky@yandex.ru

Развитие дефектов в заобделочном пространстве подземных сооружений (тоннелей, шахт, вентиляционных стволов) может приводить к нарушению их эксплуатационной надежности и необходимости дорогостоящих ремонтных работ. В условиях значительной протяженности таких объектов информативность точечных прямых способов контроля ограничена, что обуславливает применение методов технической геофизики. Сейсмоакустические обследования выполняются методом анализа отклика (ГОСТ Р 71733-2024), основанным на регистрации искусственно возбужденных колебаний для оценки сплошности конструкции и условий ее контакта с грунтом. При интерпретации данных проводится анализ распределений атрибутов, характеризующих сигналы во временной и частотной областях, при этом ключевой задачей является определение оптимального ансамбля атрибутов и уточнение критериев выявления дефектов. Предложено применение энтропийного анализа, используемого для количественной оценки сложности временных рядов. Набор атрибутов дополнен мультимасштабными энтропийными оценками, рассчитываемыми на основе RCMSE-алгоритма. Эффективность подхода продемонстрирована на данных численного моделирования и результатах обследования натурного лабораторного стенда, моделирующего систему «обделка–грунт» с заданным положением участков нарушенного контакта. Полученные результаты подтверждают диагностическую информативность энтропийных атрибутов при выявлении дефектов данного типа. Исследование выполнено в рамках госзаданий ЦГЭМИ ИФЗ РАН и ИФЗ РАН.

Ключевые слова: техническая геофизика, метод анализа отклика, энтропийный анализ, численное моделирование, физическое моделирование

УДК 534-143 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39590

ГИПОТЕЗА О ДВУХ МЕХАНИЗМАХ ФОРМИРОВАНИИ ВОЛН ЦУНАМИ ПРИ ИЗВЕРЖЕНИИ ВУЛКАНА ХУНГА-ТОНГА 15.01.2022

Р.Е.Мазова[1], А.А.Куркин[1]

[1] Нижегородский технический университет им. Р.Е.Алексеева,

ул. Минина 24, 603155 Нижний Новгород, Россия

e-mail: raissamazova@yandex.ru; aakurkin@gmail.com

Проведен сравнительный анализ механизма акустико–гравитационных волн Лэмба и форшокового оползневого механизма для генерации «ранних» волн цунами, наблюдавшихся в дальнем поле в случае события крупного извержения вулкана Хунга – Тонга в юго – западной части Тихого океана 15.01.2022. Это цунами показало более высокие (в 2,5-5 раз быстрее) скорости распространения, неожиданные высоты волн и беспрецедентную продолжительность в сравнении с цунами, генерированным сейсмическими процессами. Для проверки гипотезы оползневого характера цунами было проанализировано состояние склона вулкана до извержения (осадочные породы), проведен расчет волн цунами при возможных оползаниях склонов при накоплении предельного напряжения во время подготовки извержения, проведен расчет времени подхода этих волн от вулкана к береговым станциям. Проанализированы мареографные записи прихода «ранних» волн, и расчетных волн, генерируемых акустическими волнами Лэмба. Показано, что образовавшиеся волны цунами, могли быть сгенерированы в результате воздействия двух механизмов – обвалом кальдеры и подводными оползнями в период подготовки извержения вулкана.

Ключевые слова: вулкан, оползень, цунами, волны Лэмба.

HYPOTHESIS OF TWO MECHANISMS OF TSUNAMI WAVE FORMATION DURING THE ERUPTION OF HUNG TONGA VOLCANO ON 15.01.2022

R. Kh Mazova[1,2], Andrey Kurkin[1,3]

[1]Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

[2] P.P. Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow 917435 Russia,

[3]V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia.

e-mail address: raissamazova@yandex.ru, aakurkin@gmail.com

A comparative analysis of the Lamb acoustic-gravity wave mechanism and the foreshock landslide mechanism for generating early tsunami waves observed in the far-field during the major eruption of Hunga Tonga Volcano in the southwestern Pacific Ocean on January 15, 2022, was conducted.

This tsunami exhibited higher (2.5-5 times faster) propagation velocities, unexpected wave heights, and an unprecedented duration compared to tsunamis generated by seismic processes. To test the hypothesis of a landslide-induced tsunami, the state of the volcano slope prior to the eruption (sedimentary rocks) was analyzed, tsunami wave propagation was calculated for possible slope slides due to the accumulation of ultimate stress during the eruption preparation, and the arrival time of these waves from the volcano to coastal stations was calculated. Tide gauge records of early wave arrivals and calculated waves generated by Lamb acoustic waves were analyzed. It was shown that the resulting tsunami waves could have been generated by two mechanisms: caldera collapse and underwater landslides during the pre-eruption period.

Keywords: volcano, landslide, tsunami, Lamb waves.

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39591

Трёхмерное численное моделирование рассеяния микросейсмического шума на одиночной неоднородности дна мелкого покрытого льдом моря

Жостков Р.А.

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва

Тел.: +7(916)744-3733; E-mail: shageraxcom@yandex.ru

Выполнено трёхмерное численное моделирование изотропного микросейсмического шума в условиях покрытого льдом мелкого моря. Использован метод конечных элементов в пространстве частот. Рассмотрено рассеяние микросейсмического шума на двух типах одиночных неоднородностей морского дна. Неоднородность представляет собой раздробленную породу, обладающую более низкими скоростями распространения упругих волн, чем вмещающая среда. Представлено пространственное распределение отношения амплитуды микросейсмического шума при наличии и отсутствии неоднородности. Показана возможность использования пассивного геофизического метода сейсмической разведки (известного как метод микросейсмического зондирования) для исследования структуры морского дна как при использовании донных сейсмостанций, так и размещаемых на поверхности льда.

Ключевые слова: микросейсмическое зондирование, неоднородная среда, поверхностная акустическая волна, мелкое море, ледовый покров

УДК: 534.2 : 551.463.284 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39592

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕКТОРНЫХ ПРИЕМНИКОВ СОКОЛЕБЛЮЩЕГОСЯ ТИПА И С НЕПОДВИЖНЫМ КОПУСОМ В ЗАДАЧАХ СЕЙСМОГИДРОАКУСТИКИ

Шуруп А.С. [1,2,a], Дмитриев В.Г.[1], Коваленко А.С.[1]

[1] *МГУ имени М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, 119991.*

[2] *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, 123242.*

E-mail: [a] shurup@physics.msu.ru

В работе обсуждаются особенности применения двух типов векторных приемников (ВП) для решения задач сейсмогидроакустики. ВП соколеблющегося типа, с близкой к нулевой плавучестью, имеет давнюю историю и зарекомендовал себя при решении, в первую очередь, задач гидроакустики. Однако наличие упругой подвески ограничивает его возможности в низкочастотном, сейсмическом диапазоне частот; возникают ограничения при формировании многоэлементных антенных систем. Примером другого типа ВП является приемник на ином физическом принципе, использующим электрокинетический эффект, при этом корпус приемника остается неподвижным. В этом случае становится возможной регистрация сигналов в диапазоне от нескольких десятых герц до килогерц, что открывает перспективы решения обратных задач на основе анализа полного сейсмогидроакустического поля, формирующегося в океаническом волноводе. Приводятся результаты применения ВП обоих типов в задачах геоакустической инверсии и пассивного мониторинга на основе шумовой интерферометрии.

Работа выполнена в рамках госзаданий МГУ, ИФЗ РАН.

Ключевые слова: векторный приемник, геоакустическая инверсия, электрокинетический эффект, шумовая интерферометрия

APPLICATION OF OSCILLATING-TYPE AND FIXED-HOUSING VECTOR RECEIVERS IN SEISMOHYDROACOUSTIC PROBLEMS

Shurup A.S.[1,2,a], Dmitriev V.G.[1], Kovalenko A.S.[1]

[1] *Department of Acoustics, Faculty of Physics, Moscow State University, 119991, Russia.*

[1] *The Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS. Moscow 123995, Russia.*

E-mail: [a] shurup@physics.msu.ru

In this work we discuss the peculiarities of using two types of vector receivers (VR) for solving seismohydroacoustics problems. VP of oscillating type, with close to zero buoyancy, has a long history and has proven its high efficiency, first of all, in hydroacoustics problems. However, the use of elastic suspensions limits its capabilities in low-frequency, seismic frequency range; additional limitations arise when forming multi-element antenna systems. An example of another type of VP is a receiver based on a different physical principle, which uses the electrokinetic effect, while the hosing of receiver remains fixed. In this case, it becomes possible to receive signals in the range from several tenths of hertz to kilohertz, which gives possibilities for solving inverse problems based on the complete seismohydroacoustic field formed in the ocean waveguide. The results of application of both types of VP in problems of geoacoustic inversion and passive monitoring based on noise interferometry are presented.

This work was carried out under the state assignment of MSU and IPE RAS.

Keywords: vector receiver, geoacoustic inversion, electrokinetic effect, noise interferometry

PACS: 92.10.Vz, 43.30.+m, 43.60.Pt

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39593

Определение применимости распределенного акустического зондирования для исследования свойств ледового поля

Гравиров В.В. [1)], Преснов Д.А.[1)]

[1)] Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия;

Тел.: +7(499)254-9080; Факс: +7(499)766-2654; E-mail: gravirov@mail.ru

Знания о свойствах и состоянии ледового покрова имеет критическое значение для обеспечения безопасного и эффективного судоходства по Северному морскому пути. Кроме того, мониторинг ледового покрова необходим для прогнозирования разливов рек и для предотвращения образования ледяных заторов.

В этом контексте роль распределенного акустического зондирования (DAS) может быть неоценима. DAS является передовой технологией, которая позволяет осуществлять мониторинг больших площадей с помощью простого использования недорогого оптического волокна. Эта технология открывает новые горизонты для мониторинга природных процессов, поскольку позволяет получать данные в реальном времени и с высокой пространственной разрешающей способностью.

В данной работе представлены результаты эксперимента, в котором оптическое волокно было развернуто на льду параллельно с сейсмической косой. Это решение было принято для того, чтобы одновременно оценить как акустические, так и сейсмические параметры ледового покрова и определить практическую применимость DAS для мониторинга ледового покрова в реальном времени.

Работы были выполнены в рамках госзадания ИФЗ РАН при поддержке и участии специалистов ИФЗ РАН, компании Т8 и Института теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН: Е.П.Спиридонова, С.П.Никитина, О.Е.Нания, М.В.Белова, Д.М.Бенгальского, Г.Х.Ашкара, М.В.Костенко, Д.Р.Харасова, В.Н.Трещикова. К.В.Кислова и А.С.Шурупа.

Ключевые слова: DAS, распределенное акустическое зондирование, система мониторинга, параллельная регистрация, толщина льда

УДК: 552.08:53; 552.54 DOI: 10.34756/GEOS.2026.17.39594

Модель затухания звука при медленной релаксации в карбонатной породе

А.В. Лебедев

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН,

Нижний Новгород, Ульянова, 46

E-mail:swan@ipfran.ru

Предложена физическая модель, объясняющая наблюдавшееся в эксперименте значительное изменение коэффициента потерь после интенсивного воздействия на пористую карбонатную породу. Модель предполагает особую роль течения жидкости в узких каналах. Приведенные оценки показывают удовлетворительное согласие с результатами измерений и имеющимися данными о внутреннем строении материала.

Ключевые слова: акустика гетерогенных сред, затухание звука, медленная релаксация

PACS: 62.20.mt; 91.60.Lj.−c

Введение

Материалы со сложной внутренней структурой характеризуются аномальной по сравнению с однородными материалами акустической нелинейностью (например, [1, 2]). Отклонение от линейности проявляется, в том числе, в нелинейном гистерезисе зависимости напряжения от деформации и появлении медленной релаксации. В подавляющем большинстве экспериментальных исследований медленной релаксации основное внимание уделяется временной зависимости относительного изменения скорости распространения продольной волны. Хороший обзор современного состояния представлен в [3]. Гораздо меньше результатов представлено в литературе относительно изменения коэффициента потерь. Наиболее представительной в этом вопросе является работа [4], где было показано, что изменение потерь носит такой же характер малого возмущения, как и изменение скорости пробной волны. В недавней работе [5] нами был получен необычный результат: при малом относительном изменении скорости звука $\sim 10^{-3}$ коэффициент потерь испытывал возмущения до 20%, что является существенной величиной возмущения. В представленном сообщении обсуждается возможная модель затухания, которая объясняет результаты экспериментальных исследований [5].

На рис. 1 представлен фрагмент рисунка 3 статьи [5]. Цифры отвечают амплитудам возбуждения (накачки) в окрестности резонансной частоты продольной моды колебаний

образца карбонатной породы (подробности представлены в [5]). Амплитуды накачки составляли $\varepsilon_{p1} = 4.6 \cdot 10^{-7}$, $\varepsilon_{p2} = 8.1 \cdot 10^{-7}$, $\varepsilon_{p3} = 1.5 \cdot 10^{-6}$, $\varepsilon_{p4} = 3.1 \cdot 10^{-6}$, $\varepsilon_{p5} = 5.6 \cdot 10^{-6}$, $\varepsilon_{p6} = 10^{-5}$. Слева на рис. 1 приведены временные зависимости относительного изменения резонансной частоты, отвечающей продольной моде колебаний образца. Справа – временные зависимости относительного изменения коэффициента потерь, отвечающих той же моде колебаний. Нетрудно видеть, что длительное возбуждение с амплитудой деформации 10^{-5} привело к начальному значению относительного возмущения резонансной частоты $\sim 10^{-3}$ (значение частоты составляло примерно 22 кГц). Начальное значение относительного возмущения коэффициента потерь составило около 20%.

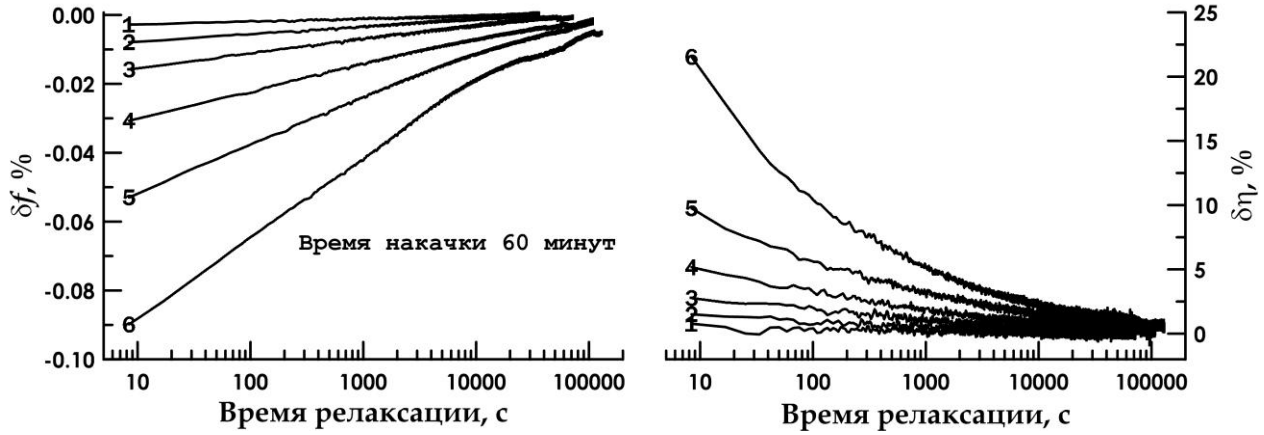


Рис. 1: Относительные изменения частоты и коэффициента потерь (смотри рис. 3 в [5])

Модель затухания и оценки величин

Состояние образца было близко к воздушно-сухому, т.е. на поверхностях зерен и пор имелось небольшое содержание воды, осажденной из водяного пара. Это позволяет предположить, что заметные возмущения коэффициента потерь каким-то образом должны быть связаны с наличием жидкости, конденсированной на поверхностях контактирующих зерен карбонатной породы, и движением этой жидкости. Рост затухания упругих волн в горных породах, вызванный движением жидкости в узких каналах, отражен в моделях движения жидкости с выдавливанием (например, [6]). Микроскопическая модель такого движения жидкости показана на рисунке 2. Строго говоря, модель с выдавливанием жидкости отвечает полному насыщению пространства пор жидкостью. Поскольку в обсуждаемом эксперименте [5] речь идет о воздушносухом состоянии пористого материала, предполагается, что пространство пор свободно от жидкости. При этом предполагается, что жидкость конденсирована в узких областях

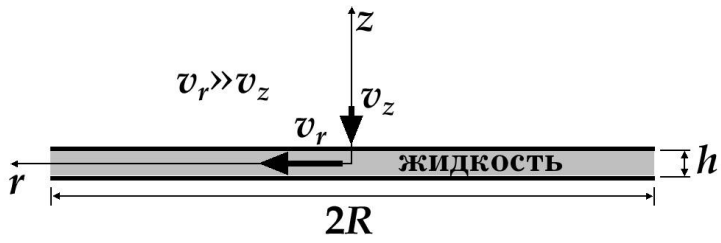


Рис. 2: Модель движения жидкости в области узкого протяженного контакта поверхностей

контакта зерен, неровностей внутри трещин и т.п. При сближении поверхностей зерен или трещин со скоростью v_z скорость радиального течения v_r оказывается существенно больше v_z. Сила трения, возникающая в канале ширины $h \ll R$ (рис. 2), равна $3\pi\eta_f v_z R^4/2h^3$, где $\eta_f = 10^{-3}$ Па·с – динамическая вязкость жидкости (воды). Далее необходимо выразить напряжение вязких сил σ_{visc}, поделив силу трения на площадь контакта и скорость v_z необходимо выразить через скорость деформации: $v_z = h\dot{\varepsilon}$. Для оценки вклада механизма «выдавливания жидкости» (рис. 2) в наблюдавшийся нами рост потерь, необходимо сравнить величину напряжения, обусловленную деформацией, с величиной σ_{visc} (промежуточные выкладки опускаем для краткости). Модель, показанная на рис. 2, подразумевает под собой следующий сценарий. В результате интенсивного продолжительного воздействия часть контактов перешла в метастабильное или возбужденное состояние. Как показывают расчеты, расстояние h, отвечающее метастабильному состоянию, имеет порядок $h \cong 10^{-8}$ м. Радиус пластины можно определить несколькими способами. Во-первых, можно допустить, что жидкость локализована только в области контакта зерен. Во-вторых, можно предположить, что какая-то часть жидкости сосредоточена внутри узких трещин, имеющих связь с пространством пор. На наличие заметного количества узких трещин указывают экспериментальные результаты [7]. Для первого способа оценки относительное изменение коэффициента потерь составит $\delta\eta(0) = 0.12\phi$, где ϕ – объемная концентрация метастабильных состояний. Величина ϕ имеет порядок отношения макроскопической остаточной деформации к локальной деформации, связанной с контактом. Локальная деформация имеет порядок отношения h к характерному радиусу зерен: $3 \cdot 10^{-4}$. Макроскопическая остаточная деформация может быть определена как отношение $\delta f/\beta$, где δf – относительное возмущение частоты, β – коэффициент квадратичной нелинейности. Значение β для карбонатных пород по многочисленным литературным источникам составляет $\beta = -435$.

Таблица 1: Оценки величин. Величины $\delta\eta^{(c)}(0)$ отвечают течению жидкости между берегами трещин размера 60 мкм

№ кривой на рис. 1	$\varepsilon(0)$	ϕ, %	$\delta\eta(0)$, %	$\delta\eta^{(c)}(0)$, %	$\delta\eta_{\text{изм}}(0)$, %
6	$2 \cdot 10^{-6}$	0.7	0.08	19	21
5	$1.2 \cdot 10^{-6}$	0.4	0.05	11	9
4	$7 \cdot 10^{-7}$	0.2	0.02	5.4	5

В таблице 1 приведены оценки интересующих величин. Для первого способа оценки, когда жидкость локализова только в области контакта зерен возмущение коэффициента потерь оказывается существенно меньше наблюдаемых в эксперименте [5]. Если предположить, что жидкость течет в узких каналах между берегами трещин, оценки возмущений оказываются согласующимися с измерениями. Наличие таких каналов и многочисленных трещин не противоречит строению карбонатной горной породы, что было показано ранее [7].

Заключение

Предложена модель, связывающая обнаруженное в эксперименте аномальное увеличение поглощения звука с движением жидкости в узких каналах. Выполненные оценки показывают, что наблюдавшиеся возмущения могут быть связаны с движением жидкости в узких трещинах, имеющих контакт с пространством пор.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №25-22-00617.

Список литературы

1. *Ostrovsky L.A., Johnson P.A.* // Rivista del Nuovo Cimento. 2001. **24**. N.7. P. 1.
2. *Guyer R.A., Johnson P.A.* Nonlinear mesoscopic elasticity: the complex behavior of rocks, soil, concrete. Wiley-VCH. 2009. 410p.
3. *TenCate J.* // Pure appl. Geophys. 2011. **168**. N.12. P. 2211.
4. *Johnson P., Sutin A.M.* // J. Acoust. Soc. Am. 2005. **117**. N.1. P. 124.
5. *Лебедев А.В., Манаков С.А.* // Акуст. журн. 2024. **70**. №2. С. 253.
6. *Dvorkin J., Nur A.* // Geophysics. 1993. **58**. N.4. P. 524.
7. *Averbakh V.S., Bredikhin V.V., Lebedev A.V., Manakov S.A.* // Acoust. Phys. 2010. **S56**. P. 794.

Model of sound attenuation with slow relaxation in the carbonate rock

A.V. Lebedev

Institute of Applied Physics of the RAS. N. Novgorod 603950, Russia.

E-mail: swan@ipfran.ru

A physical model is proposed to explain the experimentally observed anomalous change in the loss coefficient after intense stimulation of porous carbonate rock. The model assumes a special role for fluid flow in narrow channels. The presented estimates demonstrate satisfactory agreement with measurement results and available data on the internal structure of the material.

Keywords: acoustics of heterogeneous media, acoustic diagnostics of cracks

PACS: 62.20.mt; 91.60.Lj.−c

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39595

СОПОСТАВЛЕНИЕ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА ВЕРТОЛЕТА С ВУЛКАНИЧЕСКИМ ТРЕМОРОМ

Шамаев Н.В., Преснов Д.А.

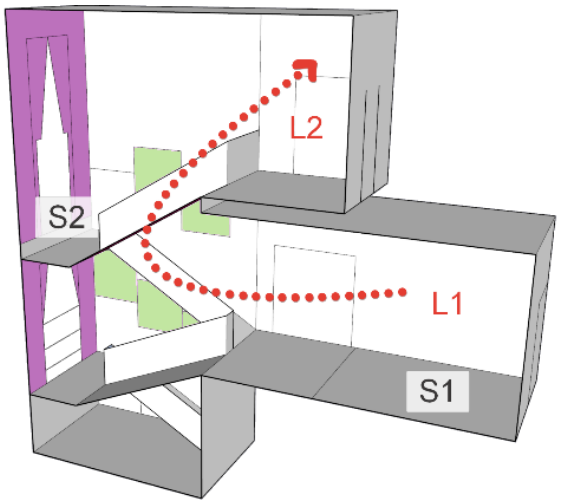
[1)] Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, г. Москва. Тел.: (915 2517193); Факс: (499 2549080); E-mail: shamaev@ifz.ru

В работе исследуется акустическое и сейсмическое волновое поле, формируемое вертолетом, пролетающим на малой высоте над земной поверхностью. Особое внимание уделяется анализу спектральных особенностей сигналов, а также их пространственно-временных характеристик. Рассматривается влияние параметров полета вертолета — скорости, числа лопастей несущего винта на возникающий эффект Доплера. Выполнен комплексный лабораторно-полевой эксперимент, основанный на синхронной многоканальной регистрации сигналов. Использовались линейная акустическая антенная группа и линейная сейсмическая группа, развернутые вблизи трассы пролета вертолета. Такая схема измерений позволила сопоставить акустические и сейсмические отклики, выявить корреляцию между ними и оценить особенности распространения возмущений в воздушной и твердой средах. Обсуждается физический механизм генерации сейсмического сигнала, регистрируемого в подземном помещении на геофизическом постаменте. Рассматривается роль акустико-сейсмического преобразования на границе «воздух–грунт», влияние резонансных свойств строительных конструкций и локальных неоднородностей геологической среды. Анализируется сходство сигналов создаваемых вертолетом с вулканическим тремором, что избежать неправильной интерпретации сейсмического шума.

Ключевые слова: сейсмоакустика, вулканы, шум, поверхностная волна, тремор, эффект Доплера, инфразвук, вертолет, лопасти

Назад к содержанию секции

СЕКЦИЯ АРХИТЕКТУРНАЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ АКУСТИКА





(а) (б) (в)

назад к Содержанию

СОДЕРЖАНИЕ СЕКЦИИ АРХИТЕКТУРНАЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ АКУСТИКА

1. РАЦИОНАЛЬНЫЕ ЗВУКОИЗОЛИРУЮЩИЕ ОГРАЖДЕНИЯ
Монич Д.В.....752

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ ОГРАЖДЕНИЙ ИНТЕНСИМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ НА ЛАБОРАТОРНЫХ СТЕНДАХ
Гребнев П.А.....758

3. К ВОПРОСУ ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ СОВРЕМЕННЫХ КИНОСЪЕМОЧНЫХ ПАВИЛЬОНОВ
Волченкова И.С., Перетокин А.В.....764

4. ОЦЕНКА ПЕРЕДАЧИ ШУМА ПО ЛЕСТНИЧНЫМ ПРОЛЕТАМ С ПРИМЕНЕНИЕМ АКУСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
Стукало А.А., Алешкин В.М.....765

5. АКУСТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ БЕЗЭХОВОЙ КАМЕРЫ В НИИ СТРОИТЕЛЬНОЙ ФИЗИКИ
Бикмухаметов Ф.Р., Канев Н.Г. 772

6. СНИЖЕНИЕ ШУМА ЛАМЕЛЬНЫМ ЭКРАНОМ: ЛАБОРАТОРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ
Долгер А.Р., Канев Н.Г.....778

7. УСТОЙЧИВЫЙ МЕТОД ГИУ ДЛЯ РАСЧЕТА СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ В ОБЛАСТЯХ С УГЛАМИ С ПРИЛОЖЕНИЕМ К АКУСТИКЕ МАЛЫХ ПОМЕЩЕНИЙ
Сумбатян М.А.....784

8. СПЕЦИФИКА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ РАННИХ ОТРАЖЕНИЙ В ЗАЛАХ ТЕАТРОВ СОВЕТСКОГО МОДЕРНИЗМА
Шевцов С.Е 790

9. НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ЗВУКОПОГЛОЩЕНИЯ И РАСЧЕТА ВРЕМЕНИ РЕВЕРБЕРАЦИИ ПОМЕЩЕНИЙ
Канев Н.Г.....794

10. О ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТА ЗВУКОПОГЛОЩЕНИЯ В РЕВЕРБЕРАЦИОННОЙ КАМЕРЕ
Адамович М.Б., Канев Н.Г. 801

11. НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ ОЦЕНКИ ВРЕМЕНИ РЕВЕРБЕРАЦИИ В ПОМЕЩЕНИЯХ ПРИ АКУСТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ
Алешкин В.М., Канев Н.Г., Субботкин А.О., Числов Д.С. 807

12. ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ АКУСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ УЧЕБНЫХ КЛАССОВ НА ПРИМЕРЕ ШКОЛЫ «САМОЛЕТУМ»
Числов Д.С., Алешкин В.М., Стукало А.А., Субботкин А.О. 815

13. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ АКУСТИКИ ЗРИТЕЛЬНЫХ ЗАЛОВ (РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАЗРАБОТКЕ СВОДА ПРАВИЛ)
Колмаков А.В. 822

14 АКУСТИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЗАЛОВ И СПОСОБЫ ИХ РЕШЕНИЯ
Лившиц А.Я. Фадеев А.С. 827

15. АКУСТИКА КОНФЕРЕНЦ-ЗАЛА МУЗЕЯ «АТОМ» НА ВДНХ
Алешкин В.М., Числов Д.С. 833

16. АКУСТИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ЗРИТЕЛЬНЫХ ЗАЛОВ НОВЫХ ОПЕРНЫХ ТЕАТРОВ РОССИИ
Перетокин А.В., Лившиц А.Я., Ширгина Н.Г. 840

17. ОБ АКУСТИКЕ ИСТОРИЧЕСКИХ ОПЕРНЫХ ЗАЛОВ МОСКВЫ И САНКТ-ПЕТЕРБУРГА
Лившиц А.Я., Перетокин А.В. 841

УДК: 699.844 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39596

Рациональные звукоизолирующие ограждения

Д.В. Монич[1,a]

[1] *ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет» (ННГАСУ). 603000, г. Нижний Новгород, ул. Ильинская, д. 65*

E-mail: [a]*dmitriy.monich@mail.ru*

Аннотация: в статье рассмотрены перспективы развития строительной акустики с учетом наступления Шестого технологического уклада. Отмечена необходимость применения рациональных звукоизолирующих ограждений, обеспечивающих снижение материалоемкости строительства. Представлена методика оценки рациональности звукоизолирующих ограждений. Приведено описание легкой перегородки с облицовками из звукоизолирующего метаматериала. Проведена оценка рациональности нового типа ограждения по сравнению с двумя аналогами.

Ключевые слова: строительная акустика, звукоизоляция, резервы повышения звукоизоляции, рациональное звукоизолирующее ограждение, звукоизолирующий метаматериал.

Rational soundproofing enclosures

D.V. Monich[1,a]

[1] *Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering. Nizhny Novgorod 603000, Russia*

E-mail: [a]*dmitriy.monich@mail.ru*

Abstract: this article examines the prospects for the development of building acoustics, taking into account the advent of the Sixth Technological Wave. It highlights the need for efficient soundproofing enclosures that reduce the material intensity of building. A methodology for assessing the feasibility of soundproofing enclosures is presented. A lightweight partition with a soundproofing metamaterial claddings is described. The feasibility of this new enclosure type is compared to two similar designs.

Keywords: building acoustics, sound insulation, reserves of increase of sound insulation, rational soundproofing enclosure, soundproofing metamaterial.

PACS: 43.55

Введение

Шумовое загрязнение является одним из негативных факторов человеческой цивилизации XX и XXI века. Воздействие повышенных уровней шума человек испытывает днем и ночью – в своем жилище, на работе, в транспорте. Это является стресс-фактором, который вызывает заболевания сердечно-сосудистой и нервной систем, снижает сопротивляемость организма инфекционным заболеваниям. Особенно опасным является воздействие шума на детей. По данным контрольно-надзорных органов России жалобы граждан на повышенные уровни шума составляют 67% от общего числа жалоб на неблагоприятные условия проживания. Более 30% рабочих мест (в ряде отраслей – более 50%) не соответствуют нормативным требованиям по уровню шума. Ежегодный рост уровней шума в городах составляет от 1 до 3 дБ, что подтверждает прогноз по ухудшению шумового загрязнения среды обитания человека в предстоящие 30 лет.

Поэтому развитие архитектурно-строительного комплекса должно быть гармонизировано с природой, способствовать формированию акустически безопасной и комфортной среды обитания человека.

1 Перспективы развития строительной акустики

Сегодня мир стоит на пороге Шестого технологического уклада. Его контуры только начинают формироваться, а в 2040-х – 2050-х годах прогнозируется пик развития. Предстоящие 20 – 30 лет будут периодом фундаментальных и прикладных научных исследований, обеспечивающих переход экономики на новый уровень технологий. Особая роль в этом процессе принадлежит архитектурно-строительному комплексу, поскольку он объединяет материальное и нематериальное начала человеческой цивилизации. Прогнозируется неуклонное повышение значимости строительной акустики на всех этапах жизненного цикла зданий и сооружений. Защита от шума из отдельного раздела проектирования превратится в функциональный элемент среды обитания человека XXI века. Это потребует создания новых методологий строительной акустики, позволяющих создавать рациональные звукоизолирующие ограждения с заранее заданными свойствами.

Акустические метаматериалы обеспечат новые, уникальные свойства ограждающих конструкций, недостижимые в настоящее время. Вместо отдельных облицовок стен, потолка и пола в помещениях будут применяться метаматериалы, позволяющие целенаправленно регулировать волновые параметры акустических колебаний. Рациональное сочетание звукоизолирующих и звукопоглощающих свойств обеспечит акустический комфорт в помещениях

без увеличения массы и толщины ограждений, с учетом современных требований снижения материалоемкости строительства.

2 Методика оценки рациональности звукоизолирующих ограждений

Логика научно-технического развития требует от новых типов звукоизолирующих ограждений повышения рациональности по сравнению с существующими аналогами. Определены следующие критерии рациональности звукоизолирующего ограждения:

1) критерий функциональности (критерий №1): повышение индекса изоляции воздушного шума (звукоизоляции) ограждения по сравнению с ограждением-аналогом. Для соответствия критерию функциональности данный параметр должен иметь положительную величину или быть равным нулю.

2) критерий изменения поверхностной плотности (критерий №2): поверхностная плотность ограждающей конструкции не должна увеличиваться по сравнению с ограждением-аналогом или увеличиваться незначительно (не более 10%);

3) критерий изменения толщины (критерий №3): толщина ограждающей конструкции не должна увеличиваться по сравнению с ограждением-аналогом или увеличиваться незначительно (не более 10%).

С учетом установленных критериев введем следующие определения:

- вариант 1: рациональное звукоизолирующее ограждение – это ограждение, обладающее более высокой звукоизоляцией по сравнению с ограждением-аналогом, что достигнуто без увеличения поверхностной плотности и(или) толщины или с их незначительным увеличением (не более 10%). Этот вариант в качестве основной цели имеет повышение звукоизоляции ограждения;

- вариант 2: рациональное звукоизолирующее ограждение – это ограждение, обладающее более низкой поверхностной плотностью и(или) толщиной по сравнению с ограждением-аналогом, при этом его звукоизоляция не изменилась. Этот вариант в качестве основной цели имеет уменьшение поверхностной плотности и(или) толщины ограждения.

Вышеуказанные варианты позволяют застройщику здания выбрать цель, которая наиболее важна для него. Это позволит правильно сформулировать задачу для разработки конструктивного решения звукоизолирующего ограждения. В современном российском строительстве, в большинстве случаев, учитываются только критерии изменения поверхностной плотности и толщины (с целью их уменьшения), без учета важнейшего критерия функциональности. Это приводит к грубым нарушениям нормативных требований СП 51.13330 «Защита от шума» по звукоизоляции ограждающих конструкций и, следовательно, к отсутствию во многих современных зданиях акустически безопасной и комфортной среды обитания человека.

3 Звукоизолирующий метаматериал

На кафедре архитектуры ННГАСУ рациональные звукоизолирующие ограждения разрабатываются на основе комплекса теоретических и экспериментальных исследований. Теоретические исследования проводятся по теории самосогласования волновых полей, разработанной профессором Седовым М.С. [1] – [3]. Это позволяет эффективно использовать резервы повышения звукоизоляции, определяемые как разница между собственной звукоизоляцией (R, дБ) и предельной звукоизоляцией (R_{max}, дБ) ограждающей конструкции [4]. Путем целенаправленного изменения конструктивных параметров, которые определяют резонансное прохождение звука (τ_r), можно приближать частотную характеристику звукоизоляции ограждения к предельным значениям.

В период с 2014 г. по настоящее время получено 12 патентов РФ на новые типы рациональных звукоизолирующих ограждений: 3 патента на изобретения и 9 патентов на полезные модели. Из них 5 патентов переданы по лицензионным договорам индустриальному партнеру (ООО «Акустик Групп, г. Москва) и внедрены в производство. С 2021 г. по 2023 г. совместно с сотрудниками Института проблем машиностроения РАН – филиала ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук», в рамках выполнения гранта РНФ № № 21-19-00813 были получены прототипы звукоизолирующих метаматериалов, а затем было разработано звукоизолирующее ограждение с облицовками из метаматериала [5] для применения в строительстве.

Звукоизолирующий метаматериал – это искусственно созданная периодическая структура, обеспечивающая снижение энергии проходящих через нее звуковых волн за счет новых волновых свойств. В настоящее время исследователи многих стран мира разрабатывают новые типы акустических метаматериалов [6], [7].

Схемы разработанного нового типа звукоизолирующего ограждения с облицовками из метаматериала показаны на рисунке. В таблице представлена оценка рациональности нового типа ограждения по сравнению с существующими типами ограждений, применяемых в настоящее время в строительстве (ограждение-аналог). Оценка рациональности проведена по двум вариантам, описанным выше (см. раздел 2 статьи). Значения требуемого индекса изоляции воздушного шума ($R_{wтреб}$, дБ) приняты по табл. 2 СП 51.13330 «Защита от шума»: 1) при оценке по варианту 1 – для перегородок между санузлом и комнатой одной квартиры в жилых зданиях; 2) при оценке по варианту 2 – для перегородок между офисами различных фирм в офисных зданиях.

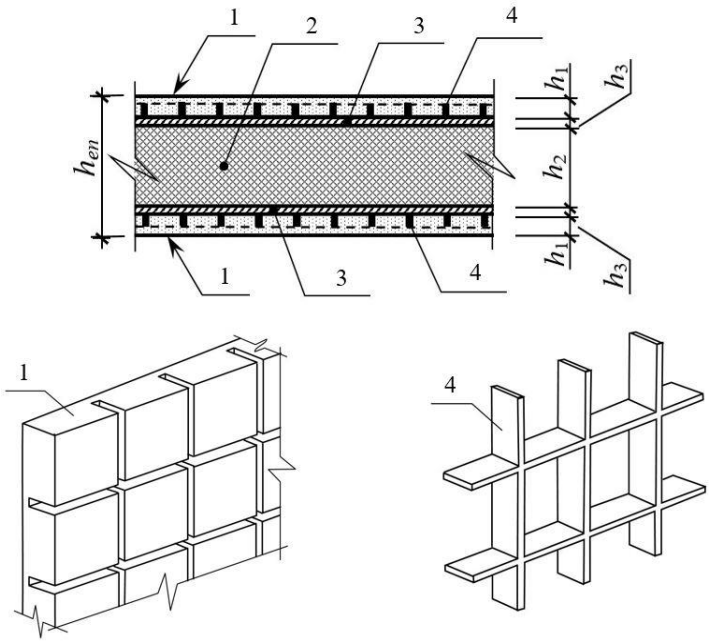


Рисунок. Схема конструктивного решения звукоизолирующего ограждения с облицовками из метаматериала общей толщиной h_{en} (поперечное сечение): 1 – фрагментированная монолитная торкрет-облицовка (гипсовая смесь) толщиной h_1; 2 – средний слой (жесткая минеральная вата или пенопласт) толщиной h_2; 3 – упругий слой, обеспечивающий акустическое разобщение среднего слоя и торкрет-облицовок (маты из полиэфирного волокна) толщиной h_3; 4 – формообразующая решетка (пенопласт или пластик), обеспечивающая фрагментирование монолитных торкрет-облицовок при нанесении гипсовой смеси

Таблица

Оценка рациональности легкой перегородки с облицовками из звукоизолирующего метаматериала

Наименование ограждающей конструкции	Поверхностная плотность, μ, кг/м^2	Толщина, h, мм	Измеренный индекс изоляции воздушного шума, R_w, дБ	Требуемый индекс изоляции воздушного шума, $R_{w\text{треб}}$, дБ	Оценка соответствия критериям рациональности		
					№1	№2	№3
Оценка рациональности нового типа ограждения по варианту 1							
Ограждение-аналог: однослойная перегородка из газосиликатных блоков *D*600	120	200	43	≥ 43	+	+	+
Новый тип ограждения: легкая перегородка с облицовками из звукоизолирующего метаматериала	52	106	51				
Оценка рациональности нового типа ограждения по варианту 2							
Ограждение-аналог: каркасно-обшивная перегородка с обшивками из гипсоволокнистых листов	35	125	51	≥ 48	+	–	+
Новый тип ограждения: легкая перегородка с облицовками из звукоизолирующего метаматериала	52	106	51				

Условные обозначения в таблице:

1) в шапке трех крайних правых столбцов нумерация критериев рациональности (№1, №2, №3) принята в соответствии с нумерацией, приведенной в разделе 2 статьи;

2) в ячейках трех крайних правых столбцов знаки «+» и «–» означают соответствие или несоответствие нового типа ограждения критериям рациональности, соответственно.

Заключение

Результаты представленных исследований показывают, что разработанный новый тип звукоизолирующего ограждения с облицовками из метаматериала является рациональным ограждением по сравнению с двумя ограждениями-аналогами, которые в настоящее время используются в гражданском строительстве. Предложенная методика оценки рациональности обеспечивает применение звукоизолирующих ограждающих конструкций, обладающих меньшей толщиной и поверхностной плотностью. Это позволяет увеличить полезную площадь помещений и снизить нагрузку на междуэтажные перекрытия зданий.

Список литературы

1. *Седов М.С.* Звукоизоляция / Техническая акустика транспортных машин: справочник / Под ред. *Н.И. Иванова.* – СПб: Политехника, 1992. Гл. 4. С. 68.

2. *Sedov M.S.* Analysis and calculation of noise insulation by light enclosures / Proceedings of International Noise and Vibration Control Conference «Noise-93», edited by *M.J. Crocker* and *N.I. Ivanov*, Vol. **3**. Saint Petersburg, 1993. P. 111

3. *Sedov M.S.* Regulation of sound radiation of light insulating structures / Proceedings of the Second International Symposium «Transport Noise and Vibration-94», edited by *S. Kovinskaya*. Saint Petersburg, 1994. P. 393

4. *Бобылев В.Н., Тишков В.А., Монич Д.В., Гребнев П.А.* Резервы повышения звукоизоляции однослойных ограждающих конструкций / Монография, Н. Новгород: ННГАСУ, 2014.

5. *Кузьмин Д.С., Монич Д.В., Бобылев В.Н., Гребнев П.А., Ерофеев В.И., Павлов И.С.* Звукоизолирующее ограждение с облицовками из метаматериала. Патент на полезную модель RU № 217696, 12.04.2023. Приоритет от 21.02.2023.

6. *Бобровницкий Ю.И., Томилина Т.М.* Поглощение звука и метаматериалы (обзор) / Акустический журнал, том **64**, № 5, 2018. С. 517.

7. *Shah S.S., Singh D., Saini J.S., Garg N., Gautam C.* Acoustical Metamaterials for Noise Control Applications / In: *Garg N., Gautam C., Rab S., Wan M., Agarwa, R., Yadav S.* (eds) / Handbook of Vibroacoustics, Noise and Harshness. Springer, Singapore, 2024. https://doi.org/10.1007/978-981-99-4638-9_64-1

УДК:699.844 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39597

Экспериментальные исследования звукоизоляции ограждений интенсиметрическим методом на лабораторных стендах

Гребнев П.А.

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет», 603000, Нижний Новгород, ул. Ильинская, 65

E-mail: p.grebnev@mail.ru

Аннотация: Приведены результаты апробации методики измерения звукоизоляции интенсиметрическим методом на примере двух измерительных комплексов реверберационных камер ННГАСУ: «Больших акустических камер» и «Новых акустических камер». Приведено экспериментальное исследование параметра годности условий измерения при определении звукоизоляции строительных изделий методом интенсиметрии в лабораторных условиях в зависимости от измерительного расстояния при измерении конструкции со сверхвысокой звукоизоляцией на лабораторных стендах. Показано сравнение экспериментальных данных лабораторных измерений изоляции воздушного шума полученных с использованием измерений уровней звукового давления по методу ГОСТ 27296-2012 и интенсивности звука по методу ISO 15186-3:2002.

Ключевые слова: интенсивность звука, косвенная звукопередача, звукоизоляция, лабораторные измерения, экспериментальные исследования.

Experimental studies of sound insulation of enclosures using the intensity method on laboratory stands

P.A. Grebnev

Department of architecture, Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering. 65, Ilyinskaya street, Nizhny Novgorod, 603000, Russia.

E-mail: p.grebnev@mail.ru

Abstract: The article presents the results of testing a sound insulation measurement technique using the intensimetric method, using two measuring systems of the NNSUSU reverberation chambers: the "Large Acoustic Chambers" and the "New Acoustic Chambers." An experimental study of the suitability of measurement conditions for determining the sound insulation of building products

using the intensimetric method under laboratory conditions is presented, depending on the measuring distance when measuring a structure with ultra-high sound insulation on laboratory benches. A comparison is shown of experimental data from laboratory measurements of airborne noise insulation obtained using sound pressure levels measured according to the GOST 27296-2012 method and sound intensity measured according to the ISO 15186-3:2002 method.

Keywords: sound intensity, indirect sound transmission, sound insulation, laboratory measurements, experimental studies.

PACS: 43.58.

Введение

При создании внутреннего пространства зданий архитекторы и инженеры-конструкторы постоянно сталкиваются с вопросами звукоизоляции. Важным источником информации о звукоизоляции внутренних конструкций зданий служат данные экспериментальных исследований в лабораторных условиях.

Для измерения изоляции воздушного шума ограждающими конструкциями зданий традиционно применяется методика, основанная на измерении уровней звукового давления ГОСТ 27296-2012 (стандартный метод). Метод измерения звукоизоляции ограждений с помощью интенсиметрии содержится в международном стандарте ISO 15186-1:2000, в 2025 году в России впервые введен ГОСТ Р 71833-2025 «Здания и сооружения. Лабораторные измерения звукоизоляции строительных элементов с использованием интенсивности звука». Исследованиями данного метода акустических измерений проводятся в НИИСФ РААСН под руководством Цукерникова И.Е. [1], [2] и в ННГАСУ [3], [4].

1 Экспериментальные исследования изоляции воздушного шума

Для апробации методики определения звукоизоляции конструкций методом интенсиметрии проведены экспериментальные исследования в акустических реверберационных камерах ННГАСУ: 1) «Большие акустические камеры» (БАК); 2) «Новые акустические камеры» (НовАК). Исследования звукоизоляции проведены по стандартной методике ГОСТ 27296 и с помощью интенсиметрического зонда, по ISO 15186-1:2000.

1.1 Сведения об используемых в работе экспериментальных установках

Испытательный комплекс НовАК представляет две смежные по горизонтали реверберационные акустические камеры, размещенные внутри общественного здания, камера низкого уровня (КНУ) при этом имеет независимую от здания конструкцию: собственные перекрытия, стены и фундамент. Объем камеры высокого уровня (КВУ) составляет 170 м^3, КНУ - 66 м^3. Площадь проема для установки образца составляет 2,5 м^2.

БАК состоит из двух смежных реверберационных камер. Каждая из двух реверберационных камер установлена на слое виброизоляции на собственном массивном фундаменте, отделенном от смежного фундамента и прилегающих конструкций здания акустическими швами шириной от 100 до 50 мм. КВУ БАК имеет объем 259 м^3, КНУ - 211 м^3. Между камерами расположен акустический шов шириной. Смежные стены реверберационных камер измерительного стенда выполнены сверхмассивными – толщиной по 1030 мм каждая, с выполненным в них испытательным проемом шириной 4,2 м и высотой 2,5 м. Конструкции испытательного стенда полностью независимы от окружающих его конструкций павильона, в котором он расположен.

1.2 Оборудование, использованное для проведения экспериментальных исследований изоляции воздушного шума

Для измерения уровней звукового давления (далее – УЗД) и времени реверберации применялся шумомер-анализатор спектра: двухканальный прецизионный интегрирующий «LarsonDavis» (США) типа 2900B.

Для измерения интенсивности использовался измерительный интенсиметрический комплекс «Sinus» (Германия), включающий в себя интенсиметрический зонд и специализированное программное обеспечение для обработки результатов измерений способный измерять уровни интенсивности в децибелах в третьоктавных полосах.

Для обеспечения стабильности и точности результатов в нормируемом частотном диапазоне (от 100 Гц до 3150 Гц) использован 12-миллиметровый вкладыш между двумя 12,5-миллиметровыми микрофонами измерительного зонда.

При измерении интенсиметрическим методом за значение звукоизоляции образца принималась модифицированная звукоизоляция по интенсивности **(**$R_{I,M}$, дБ), определяемая по формуле ISO 15186-1:2000:

$$R_{I,M} = L_{p1} - 6 - \left[L_{In} + 10\lg\left(\frac{S_m}{S}\right)\right] + K_C\,, \qquad (1)$$

где L_{p1}– средний УЗД в помещении высокого уровня, дБ; L_{In} – средний уровень интенсивности звука на измерительной поверхности в помещении низкого уровня; S_m – общая площадь измерительной поверхности, сканируемой зондом, м^2; S – площадь исследуемого образца, м^2; K_C– коэффициент адаптации, дБ.

При проведении измерений выполнялась квалификация измерительной поверхности. В камеру высокого уровня вносилось дополнительное звукопоглощение, обеспечивающие выполнение условий ISO 15186-1:2000:

$$F_{pl} = L_p - L_{In} \le 10\,, \qquad (2)$$

$$\frac{S_m}{A_2} < 1.25, \quad (3)$$

где F_{pl} – показатель «поверхностное давление-интенсивность», дБ; L_p – средний УЗД, дБ; L_{In} – средний уровень нормальной интенсивности звука**,** дБ; S_m – площадь измерительной поверхности, м^2; A_2 – эквивалентная площадь звукопоглощения КНУ, м^2.

1.3 Описание конструктивного решения исследуемых образцов ограждений

В качестве основного исследуемого ограждения использована перегородка с конструктивным решением, предназначенным для изоляции шума между помещениями с очень высокими уровнями звука (например – залы многозального кинотеатра). Облицовки из четырех слоев гипсокартонных листов высокой плотности (толщиной 12,5 мм) с каждой стороны; двойной металлический каркас из профилей шириной 100 мм (шаг 600 мм), установленных с зазором 290 мм. Заполнение каркасов выполнено звукопоглощающими матами из минеральной ваты (два слоя по 100 мм каждый).

2. Результаты экспериментальных исследований

Сравнение результатов экспериментальных исследований стандартным методом и методом интенсиметрии для образца со сверхвысокой звукоизоляцией приведены на рис. 1.

В ходе апробации методики исследования методом интенсиметрии в БАК и НовАК исследовалось влияние внесения дополнительного звукопоглощения в КНУ рекомендованное стандартом для улучшения условий измерений при различных измерительных расстояниях.

Полученные значения параметра годности приведены в табл. 1 и табл.2. Заливкой серым цветом в таблицах выделены значения показателя «поверхностное давление-интенсивность» F_{pl} и отношения S_m/A_2**,** не удовлетворяющие условиям (2) и (3).

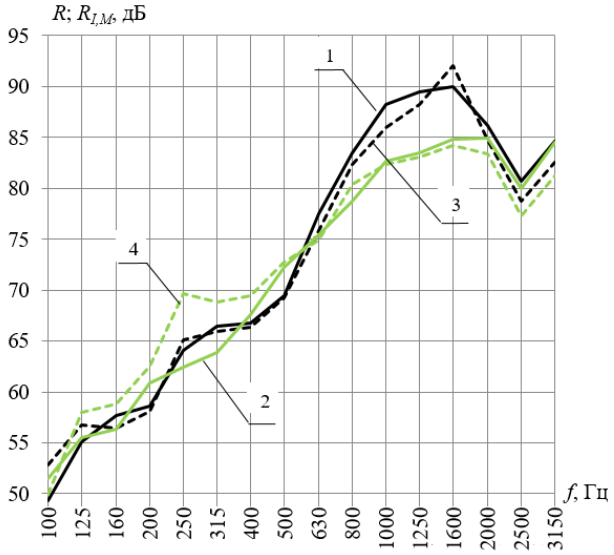


Рис. 1 Сравнение частотных характеристик звукоизоляции полученных в ходе лабораторных исследований рассматриваемыми методами: 1; 2 – стандартное измерение в БАК и НовАК соответственно; 3; 4 – измерение методом интенсиметрии в БАК и НовАК соответственно.

Таблица 1

Значения параметра годности условий измерения в зависимости от измерительного расстояния при измерении звукоизоляции в комплексе НовАК

Частота, *f*, Гц	Измерительное расстояние, мм									
	100	300	500	700	100-700	100	300	500	700	100-700
	Без дополнительного звукопоглощения					После внесения звукопоглощения				
	F_{pI},дБ				S_m/A_2	F_{pI},дБ				S_m/A_2
100	6.2	6.9	13.6	11	1.52	5.8	0.9	4.0	-5.2	0.43
125	13.4	17.8	17.5	8.1	1.86	4.5	1.2	5.8	-0.8	0.35
160	21.5	23.8	15	19	2.42	9.4	4.6	4.9	2.4	0.31
200	17.1	12.6	14.4	17.6	1.8	7.0	6.0	3.9	3.1	0.29
250	17.1	17.5	16.2	19.6	1.79	9.7	4.8	6.8	5.9	0.30
315	19.2	20.6	16.1	12	1.83	10.7	6.0	6.0	8.0	0.27
400	9.8	6.8	9.8	17.5	1.68	2.9	2.0	3.1	2.8	0.31
500	8.0	6.7	11.8	13.5	1.37	3.5	2.5	2.5	3.2	0.32
630	5.5	6.2	7.5	11.4	1.01	3.5	1.9	1.8	8.0	0.32
800	9.0	7.8	7.2	16.4	1.07	4.7	3.5	2.9	9.5	0.33
1000	8.8	11.2	11.1	9.6	1.16	8.4	3.8	2.4	8.1	0.33
1250	9.5	18	6.7	5.9	1.19	7.1	4.1	3.6	9.1	0.32
1600	8.9	13.9	12.4	13.7	1.13	6.8	5.0	5.0	10.2	0.31
2000	9.6	11.9	9.7	15.5	1.07	8.4	4.9	4.8	9.1	0.26
2500	6.4	6.7	6.4	10.8	0.97	5.6	3.0	2.7	6.8	0.23
3150	8.3	12.7	12.2	14.7	0.83	5.5	6.2	6.7	8.8	0.21

Таблица 2

Значения параметра годности условий измерения в зависимости от измерительного расстояния при измерении звукоизоляции в комплексе БАК

Частота, *f*, Гц	Измерительное расстояние, мм					
	300	600	900	1100	300 - 1100	300 - 1100
	Без дополнительного звукопоглощения					После внесения звукопоглощения
	F_{pI},дБ				S_m/A_2	S_m/A_2
100	7.9	9.0	13.0	12.0	2.52	1.25
125	8.7	10.9	8.9	7.9	2.21	1.23
160	6.5	10.4	8.6	8.4	2.15	1.24
200	9.6	7.2	7.6	8.1	2.02	1.20
250	7.9	7.1	8.2	6.6	1.76	1.11
315	8.7	6.6	6.4	6.5	1.61	1.05
400	8.4	8.6	6.9	6.1	1.55	0.96
500	7.8	6.9	6.8	4.7	1.34	0.87
630	7.9	8.4	6.5	4.1	1.30	0.83
800	6.8	9.7	7.4	4.0	1.26	0.8
1000	8.1	3.4	5.0	0.9	1.12	0.76
1250	4.8	1.9	1.5	0.5	1.02	0.74
1600	5.0	5.7	4.2	3.4	0.98	0.71
2000	5.4	6.9	6.1	4.2	0.89	0.65
2500	5.4	6.0	5.7	4.4	0.80	0.60
3150	5.8	6.5	6.2	4.7	0.73	0.53

Заключение

Анализируя данные представленные в таблицах 1 и 2 в качестве измерительного расстояния для измерений в БАК и НовАК выбрано унифицированное значение 300 мм. Для выполнения рекомендаций ISO звукопоглощение вносилось порциями, в результате чего определено количество звукопоглотителей, требуемое для выполнения условий годности в каждой из камер. При этом установлена возможность проведения измерений методом интенсиметрии и без достижения оптимальных параметров, приведенных в табл. 1 и 2.

В БАК характер частотной характеристики звукоизоляции ограждения получаемой исследуемыми методами приведенный на рис 1 совпадает, разница значений в рассматриваемом частотном диапазоне составляет от 0 до 3 дБ. В НовАК имеются превышения значений, полученных интенсиметрическим методом над значениями полученными стандартным методом в области частот от 125 до 400 Гц, что может быть вызвано недостаточной точностью стандартного метода, для образца со сверхвысокой звукоизоляцией, приближающийся к предельной для испытательного стенда НовАК. Данный вопрос будет исследован в последующих работах.

Список литературы

1. *Цукерников И.Е., Невенчанная Т.О., Щурова Н.Е.* Оценка условий измерения при определении звукоизоляции строительных изделий методом интенсиметрии в лабораторных условиях // Noise Theory and Practice. – 2024. – Т. 10, № 2(37). – С. 7-16

2. *Цукерников И.Е., Невенчанная Т.О., Щурова Н.Е.*, *Тихомиров Л.А.* Сравнительная оценка методов определения изоляции воздушного шума строительными изделиями в области низких частот по ГОСТ р 10140-4 и ISO 15186 // Сборник трудов, посвященных памяти академиков РААСН В.М. Бондаренко и Г.Л. Осипова, Москва, 01–03 июля 2025 года. Москва: Российская академия архитектуры и строительных наук, 2025. С. 119-127.

3. *Гребнев П.А., Монич Д.В.* Лабораторные исследования сверхвысокой звукоизоляции ограждений // Жилищное строительство. 2025. № 6. С. 17-24.

4. *Гребнев П.А.* Методика определения границ применения интенсиметрического метода при измерениях звукоизоляции в лабораторных условиях // Приволжский научный журнал. 2025. № 2(74). С. 43-52.

УДК 534 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39598

К вопросу звукоизоляции современных киносъемочных павильонов

Волченкова И.С.[1)], Перетокин А.В.[1)]

[1)] ООО «Проектный Институт Строительной Акустики», г. Москва

Тел.: +7(953)737-7115; E-mail: irina.volchenkova@pistra.ru

В последние годы в России наблюдается активный рост строительства современных киносъемочных павильонов и реконструкции существующих павильонов. Для обеспечения качественной записи звука во время кинопроизводства звукоизоляция ограждающих конструкций павильонов должна достаточно высокой. Однако в настоящее время в нашей стране отсутствуют актуальные стандарты в области нормирования акустических параметров в таких помещениях. В статье рассмотрены вопросы нормирования звукоизоляции в современных условиях, проблемы реализации высоких значений звукоизоляции в киносъемочных павильонах, приведены примеры ограждающих конструкций современных павильонов и их звукоизоляционные характеристики.

Ключевые слова: строительная акустика, киносъемочный павильон, звукоизоляция

УДК: 534.843 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39599

Оценка передачи шума по лестничным пролетам с применением акустического моделирования

А.А. Стукало[1)], В.М. Алешкин[1, 2)]

[1)] ООО «АС-Акустик», г. Москва;
[2)] Научно-исследовательский институт строительной физики (НИИСФ РААСН), г. Москва;
Тел.: +7 (910 4947850); E-mail: a.stukalo@as-acoustic.ru

В действующих нормативных документах отсутствует регламентированная методика расчета снижения шума при распространении по лестничным пролетам между этажами жилых зданий. В рамках исследования выполнена оценка передачи шума по лестничным маршам между этажами с проведением натурных акустических измерений и расчетов с применением лучевых методов. Показано, что расчетную оценку передачи шума в таком случае некоторыми допущениями можно производить с применением ПО для акустического моделирования EASE. Результаты моделирования и измерений показали приемлемое совпадение (по уровню звука в пределах 1-2 дБА). В откалиброванной модели произведена оценка эффективности снижения передачи шума по лестничному пролету при применении звукопоглощающей отделки. Рассмотренный подход может применяться при разработке акустических решений и оценке снижения передачи шума между этажами по лестничным пространствам, коридорам и иным связанным объемам.

Ключевые слова: акустика помещений; защита от шума; лестничный марш; звукоизоляция; снижение уровня шума; акустические измерения; акустическое моделирование

Prediction of noise transmission through stairwells Using acoustic modeling

A.A. Stukalo[1)], V.M. Aleshkin[1, 2)]

[1)] AS-Acoustic LLC, Moscow
^2 Research Institute of Building Physics (NIISF RAASN), Moscow
E-mail: a.stukalo@as-acoustic.ru

Current regulatory documents do not provide a standardized method for calculating noise reduction during sound propagation through stairwells between floors in residential buildings. In this study, noise transmission along stair flights between floors was assessed by means of in-situ acoustic measurements and calculations using ray-based methods. It is shown that, with certain assumptions, the transmission of noise in such cases can be estimated using EASE acoustic modeling software. The simulation and measurement results demonstrated acceptable agreement, with differences in sound level within 1 dBA. The calibrated model was then used to evaluate the effectiveness of reducing noise transmission through the stairwell by applying sound-absorbing finishes. The

proposed approach can be used in the development of acoustic solutions and in assessing the reduction of noise transmission between floors through stairwells, corridors, and other connected spaces.
Keywords: room acoustics; noise control; stair flight; sound insulation; noise level reduction; acoustic measurements; acoustic modeling

Введение

Вопрос передачи шума через открытые лестничные пролеты между этажами не отражен в отечественных нормативных документах. Действующие требования ориентированы в основном на звукоизоляцию ограждающих конструкций и допустимые уровни шума в помещениях, тогда как в рассматриваемом случае речь идет о звукосвязи между зонами, объединенными лестничным пролетом в общий воздушный объем. Актуальность рассматриваемого вопроса состоит в популярности минималистичного дизайна, сочетающего большое количество гладких звукоотражающих поверхностей в интерьере и открытых планировочных решений, из-за чего в том числе возникает проблема передачи шума через лестничные пролеты.

Обзор научной литературы и публикаций показывает, что близкая проблематика рассматривается скорее в контексте акустики связанных объемов [3-5] и часто применяется в сложных пространствах таких как атриумы, офисные помещения типа open-space, храмы, однако также встречаются и работы, посвященные жилым помещениям (см., напр., [1-2]). В работах Антонова и пр. ([6] и схожие исследования авторов) предлагается расчетная методика оценки передачи шума по длинным помещениям и в связанных помещениях, которая реализована в виде программного комплекса, однако она представляется сложной для широкого использования в инженерной практике.

1. Краткий план и описание объекта исследования

При передаче шума через из одного помещения в другое через общий воздушный объем (например, лестничный марш, коридор или иное помещение) следует учитывать как затухание звука с расстоянием, так и влияние звукопоглощающих свойств ограждений в данном объеме. Оба фактора возможно учесть и оценить с использованием распространенного в инженерной практике ПО для акустического моделирования, основанного на методе прослеживания лучей - например, AFMG EASE с модулем AURA. В случае, если модель в таком ПО будет откалибрована по результатам натурных измерений времени реверберации и уровней звукового давления (УЗД) в реальных помещениях, то возможно будет оценить не только величину времени реверберации, но и относительного снижения УЗД при передаче из одной зоны в другую.

В качестве примера в данном исследовании рассмотрен жилой дом с открытым

лестничным проемом, соединяющим холл 1-го этажа, связанный с шумными зонами кухни и прихожей, и жилую зону 2-го этажа (см. рис. 1). Отделка стен и потолка во всех зонах представляет собой окрашенную штукатурку, пол – паркет, на остеклении отсутствовали шторы. При такой отделке и планировке лестница становится каналом передачи шума между этажами, а в связи с большим общим воздушным объемом пространства дома в нем образуется повышенный уровень реверберационно-шумового фона, а любой отрывистый звук приводит к долгому отзвуку и передается во все связанные помещения без существенных потерь. Наиболее эффективным способом снижения передачи шума в подобных условиях было бы устройство звукоизолирующей отсечки, в виде дверной группы перед лестничным объемом. Однако в данном случае такой вариант не принимался, поскольку противоречил исходной архитектурной идее открытого пространства.

В рамках решения практической задачи снижения передачи шума были произведены натурные акустические измерения, а также построена акустическая модель в ПО EASE, в которой были заданы коэффициенты звукопоглощения таким образом, чтобы время реверберации в модели совпадало с измеренным. После выполненной таким образом калибровки была оценена звукосвязь между этажами (снижение УЗД в отдельных полосах частот при передаче снизу вверх), а также разработаны мероприятия по размещению в объеме лестницы звукопоглощающих материалов и конструкций на стенах и потолке, приводящие к снижению времени реверберации в объеме лестницы и, как следствие, к снижению передачи шума через нее.

По результатам расчетов в откалиброванной модели стало возможным оценить точность оценки передачи шума (путем сравнения с результатами измерений), а также прогнозируемую эффективность решений снижения передачи шума в виде заглушения объема лестницы.

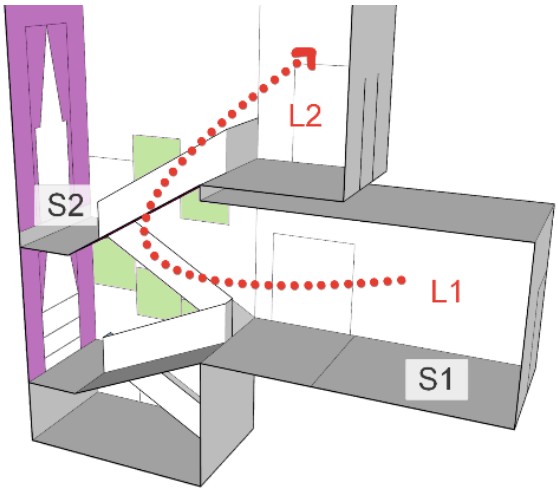


Рисунок 1 — Изометрия компьютерной акустической модели помещений

2. Анализ результатов измерений и расчетов

Оценки передачи шума между помещениями был использован ненаправленный источник звука, установленный в дальней части холла на 1-м этаже (см. обозначение S1 на рис. 1), на который подавался тестовый широкополосный шумовой сигнал. УЗД измерялись и усреднялись по ряду точек в холле на 1-м этаже (см. обозначение L_1 на рис. 1), а также на площадке лестницы на уровне 2-го этажа (см. обозначение L_2 на рис. 1).

Время реверберации измерялось независимо в холле (источник в положении S1) и в лестничном объеме (источник в положении S2). Объем холла на 1-м этаже (без учета присоединенных помещений) составил около 54 м^3, объем лестничного марша выше уровня 1-го этажа вместе с площадкой на 2-м этаже составил около 92 м^3, т.е. воздушные объемы помещений холла и лестницы отличаются примерно в 1.7 раза. Несмотря на достаточно большую площадь соединяющего их проема, измеренное время реверберации в этих двух объемах заметно отличалось в диапазоне 500-2000 Гц: в холле – 1.4…1.5 с, на лестнице – 1.6…1.8 с (см. рис. 2).

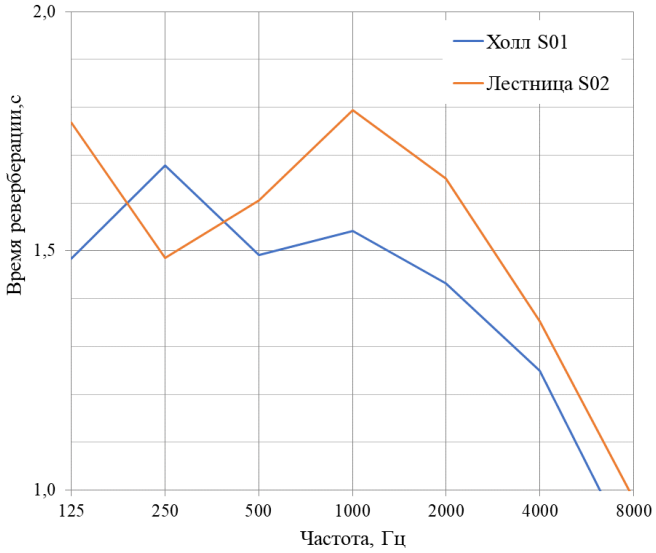


Рисунок 2 — Сравнение измеренного времени реверберации в холле и лестничном объеме

В построенной и откалиброванной по результатам измерений акустической модели ненаправленный источник был установлен в том же положении, что и при измерениях, а расчетные зоны в холле 1-го этажа и на площадке 2-го этажа выбраны аналогично точкам измерений.

В табл. 1 и на рисунке 3 показана величины снижения УЗД в октавных полосах частот и по суммарному уровню звука в дБА, полученные по результатам измерений и расчетов в откалиброванной акустической модели. Измеренная разность УЗД составила в среднем 8-9 в октавных полосах частот, рассчитанная – порядка 7-8 дБ. По эквивалентному уровню звука разница между измерениями и расчетами составила порядка 1 дБА.

Полученные результаты показывают приемлемую сходимость (расчетные значения ниже измеренных в среднем на 13%), что позволяет составить представление о величине снижения шума при передаче в связанных объемах с применением подобного метода.

Таблица 1

Измеренное и рассчитанное в модели снижение УЗД при передаче шума с 1-го на 2-й этаж через лестничный объем

Режим	**Снижение УЗД, дБ, при передаче шума с 1-го на 2-й этаж через лестницу, в октавных полосах частот, Гц**							**Снижение экв. уровня звука, дБА**
	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Натурные измерения	7.6	7.9	9.1	8.7	8.5	9.0	11.3	**9**
Расчет в акустической модели	8.2	7.0	7.1	7.3	7.3	7.4	9.4	**8**

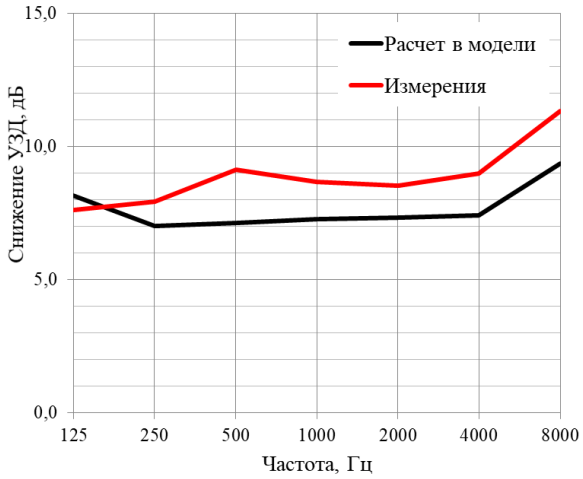


Рисунок 3 — Сравнение измеренного и расчетного снижения УЗД при передаче из холла на 1-м этаже на лестничную площадку 2-го этажа

3. Оценка снижения передачи шума за счет применения акустической отделки

В откалиброванной модели были рассмотрены несколько вариантов акустической отделки в различных комбинациях, в т.ч.: тяжелые шторы на витражах остекления лестничного объема; акустические панели на стенах и потолке лестницы; акустическое напыление на потолке и нижней части лестничных маршей. При оценке эффективности анализировались два параметра: время реверберации в объеме лестничных маршей и снижение УЗД при передаче между этажами (расчетная разность усредненных уровней УЗД $L_2 - L_1$).

Полученные результаты показывают, что эффективность акустической отделки определяется не только ее общей площадью, но и местом размещения. Наиболее заметный эффект достигается при добавлении на остеклении лестницы тяжелых штор, а также акустической обработки нижней части лестничных маршей, то есть поверхностей, активно

участвующих в формировании многократных отражений по пути распространения звука. Данные решения обеспечили снижение времени реверберации в области средних и высоких частот с 1.5 – 1.8 с соответственно до 0.9 – 1.0 с (шторы+акустические панели на стенах) либо до 0.4 -0.6 с (шторы + акустическое напыление на потолке и нижней части лестниц). При этом на низких частотах эффективность стандартных решений по звукопоглощающей отделке оказывается ниже. Кроме того, применение лучевого метода для оценки звукового поля в низкочастотном диапазоне не является корректным, поскольку в этой области проявляются волновые свойства звука (в объеме лестницы формируются стоячие волны, а также имеет место дифракция на краю лестничной площадки, что не учитывается при моделировании). В целом, можно заключить, что снижение передачи шума между помещениями в низкочастотном диапазоне путем внесения звукопоглощающей отделки является одновременно слабоэффективным способом и вместе с тем затруднительным для расчетной оценки.

На рис. 4 показана величина снижения передачи шума между этажами, рассчитанная в откалиброванной модели для описанных выше методов (см. описание к рисунку). Из расчетов следует, что за счет добавления тех или иных решений максимальный эффект снижения, которого удается достичь, составляет в области средних и высоких частот от 10 до 14 дБ (по сравнению с 7-8 дБ без отделки). Таким образом, дополнительное снижение передачи шума, которого удалось бы достичь за счет внесения звукопоглощения в объем лестницы, составляет не более 7 дБ.

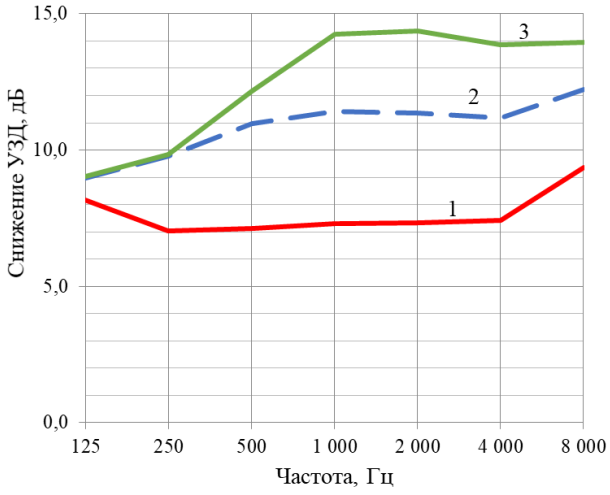


Рисунок 4 – Расчетное снижение УЗД при передаче шума между этажами при добавлении акустической отделки: 1 – исходная величина снижения (без отделки); 2 – шторы + акустические панели на стенах; 3 – шторы + акустическое напыление на потолке и нижней части лестничных маршей

Заключение

По результатам проведенного анализа показано, что ПО для акустического моделирования может использоваться как удобный инженерный инструмент для оценки

передачи шума по лестничным пролетам и дает приемлемую сходимость с результатами натурных измерений. Такой подход может применяться при анализе передачи шума не только в жилых домах, но и в общественных зонах, коридорах, атриумах и других связанных объемах.

Оценена эффективность снижения передачи шума по лестнице за счет применения акустической отделки. Показано, что звукопоглощающее оформление позволяет увеличить суммарное снижение уровня звука между этажами от исходных 7-9 дБ до 11–14 дБ, а дополнительное снижение УЗД за счет заглушения лестничных маршей составляет порядка 3–7 дБ. Звукопоглощающая отделка для подобных целей эффективна в первую очередь в области средних и высоких частот.

Список литературы

1. *Matsuda T., Shimizu T., Suminaga H., Yoshitani K., Koike M., Matsushima Y.* Experimental Study on Use of Sound Absorption Treatment for Reduction of Environmental Sound Propagation and Reverberation in Staircases: A Case Study in Housing // Buildings. 2017. Vol. 7, no. 1. Art. 14.
2. *Niermann A.* Silence at work - noise at home: a case study // 12th ICBEN Congress on Noise as a Public Health Problem, Zurich, Switzerland, 18–22 June 2017.
3. *Götz G., Schlecht S. J., Pulkki V.* Common-slope modeling of late reverberation in coupled rooms // Proceedings of the 24th International Congress on Acoustics: A12: Room Acoustics. Gyeongju, Republic of Korea, 24–28 October 2022. Seoul: Acoustical Society of Korea, 2022. P. 1–12.
4. *Щиржецкий Х.А, Алешкин В.М., Субботкин А.О., Сухов В.Н.* К вопросу объективной оценки акустики связанных помещений // Ученые записки физического факультета Московского университета. – 2017. – № 5. – С. 1750502
5. *Mahdavi A., Lechleitner J., Pak J.* Measurement and predictions of room acoustics in atria // Journal of Building Performance Simulation. 2008. Vol. 1, no. 2. P. 67–74.
6. *Антонов А.И., Соломатин Е.О., Цева А.В.* Метод расчета шума в длинных помещениях // Вестник МГСУ. 2013. № 1. С. 19–25.

УДК: 534.62 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39600

Акустические показатели безэховой камеры в НИИ строительной физики

Ф.Р. Бикмухаметов[1,a], Н.Г. Канев[2,3,b]

[1] *Университет ИТМО. Ул. Ломоносова, 9, Центральный район, Санкт-Петербург 191002.*

[2] *НИИ строительной физики. Локомотивный проезд, 21, Москва 127238.*

[3] *НИУ МГСУ, Ярославское шоссе, 26, Москва*

E-mail: [a]f.bikmukhametov@metalab.ifmo.ru, [b]lab-42@mail.ru

В данной работе представлены актуальные акустические характеристики безэховой звукомерной камеры НИИ строительной физики. Показано, что отраженный от пола звук никак не влияет на проводимые на третьем этаже камеры измерения и третий этаж может рассматриваться как полностью заглушенное помещение в соответствии с требованиями ГОСТ ИСО 3745. Также было экспериментально доказано, что собственные низкочастотные моды камеры не влияют на качество проводимых измерений.

Ключевые слова: безэховая камера, собственные моды помещения, свободное акустическое поле, поглощение звука, отраженный импульс

Acoustic parameters of the anechoic chamber at the Research Institute of Building Physics

F.R. Bikmukhametov[1,a], N.G. Kanev[2,3,b]

[1] *Faculty of Physics, ITMO University, St. Petersburg 191002, Russia.*

[2] *Laboratory «Acoustic of Halls, Moscow State University. Moscow 119191, Russia.*

[3] *Moscow State University of Civil Engineering, Yaroslavskoe shosse, 26, Moscow*

E-mail: [a]f.bikmukhametov@metalab.ifmo.ru, [b]lab-42@mail.ru

This paper presents the current acoustic characteristics of the anechoic sound measurement chamber at the Research Institute of Building Physics. It is shown that the sound reflected from the floor does not affect the measurements carried out on the third floor of the chamber and the third floor can be considered as an anechoic room in accordance with the requirements of GOST ISO 3745. It has also been experimentally proven that low-frequency modes does not affect the quality of measurements.

Keywords: anechoic room, room's own modes, free acoustic field, sound absorption, reflected pulse

PACS: 43.58.-e

Введение

Безэховая камера – это специальное помещение, устройство которого позволяет значительно подавлять отраженные от потолка, стен, а иногда и пола звуковые волны, за счёт чего в камере

создаётся свободное акустическое поле, в условиях которого можно проводить высокоточные измерения [1], [2]. Обычно такой эффект достигается благодаря покрытию стен камеры специальными звукопоглощающими конструкциями в виде клиньев, сделанных из пористых материалов [3]. Заглушенные камеры можно поделить на два типа: заглушенные, в которых звукопоглощающими конструкциями покрыты потолок, стены и пол, и полузаглушенные, в которых звукопоглощающими конструкциями покрыты только потолок и стены. Безэховая камера в НИИСФ РААСН – это полузаглушенная камера с тремя этажами из решетчатого пола. Актуальность исследования акустических характеристик безэховой камеры обуславливается необходимостью проведения измерений в условиях свободного акустического поля. В настоящей работе представлены геометрические характеристики камеры, показано, что наличие низкочастотных собственных мод, связанных с размерами помещения, никак не сказывается на проводимых измерениях, а также экспериментально подтверждено, что третий этаж камеры может рассматриваться как полностью заглушенное помещение в соответствии со стандартом ГОСТ ИСО 3745 [4].

1 Характеристики безэховой камеры

Безэховая камера НИИСФ РААСН (рис. 1) представляет собой прямоугольное помещение размерами 12.3 м в длину, 10.8 м в ширину и 12.2 м в высоту по кончикам клиньев. Сама камера разделена решетчатым полом на три этажа на отметках 4 и 8 м.



(а) (б) (в)

Рисунок 1 – Фотография безэховой камеры НИИСФ РААСН: (а) – первый этаж безэховой камеры, (б) – третий этаж безэховой камеры, (в) – звукопоглощающие клинья, используемые для покрытия стен и потолка

2 Собственные моды безэховой камеры

В помещениях могут возникать стоячие волны, наличие которых может нарушать условие свободного акустического поля. Важно, чтобы заглушенная камера не имела высокодобротных собственных мод. На рис. 2 приведены результаты измерения звукового давления в углу первого этажа камеры, в котором располагался микрофон. В противоположном углу устанавливался источник шума. В низкочастотной области есть только один ярковыраженный пик – на частоте 10.2 Гц. На более высоких частотах собственные резонансы камеры значительно демпфируются.

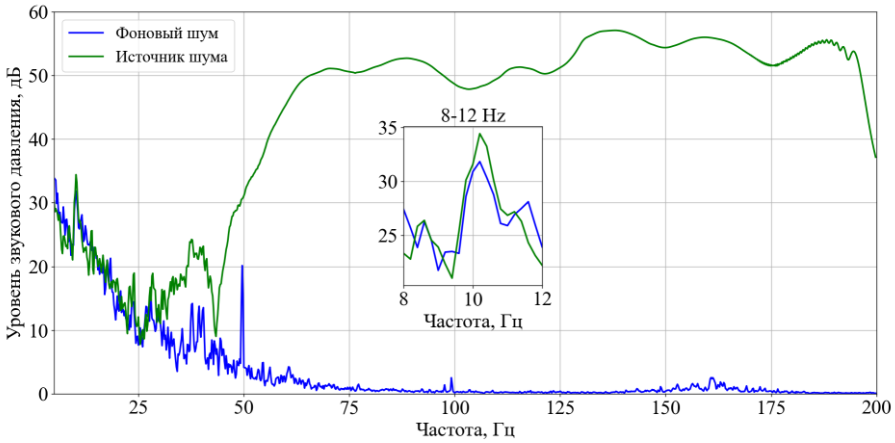


Рисунок 2 – Результаты измерений уровня звукового давления в углу камеры при расположении источника звука в противоположном углу

3 Соответствие безэховой камеры критериям ГОСТ ИСО 3745

Согласно [4] в безэховой камере должно создаваться свободное акустическое поле. Это означает, что уровень звукового давления должен быть обратно пропорционален расстоянию до источника. В первую очередь интерес представляет область низких частот, на которых могут проявляться собственные моды помещения.

3.1 Источник звука

Для проведения измерений согласно [4] источник должен быть ненаправленным. Это означает, что значения акустических давлений на всех точках полусферы заданного радиуса не должны отклоняться от среднего значения по всем точкам больше, чем на величину, установленную в [4]. В качестве источника звука был использован додекаэдр, представленный на рис. 3, а.

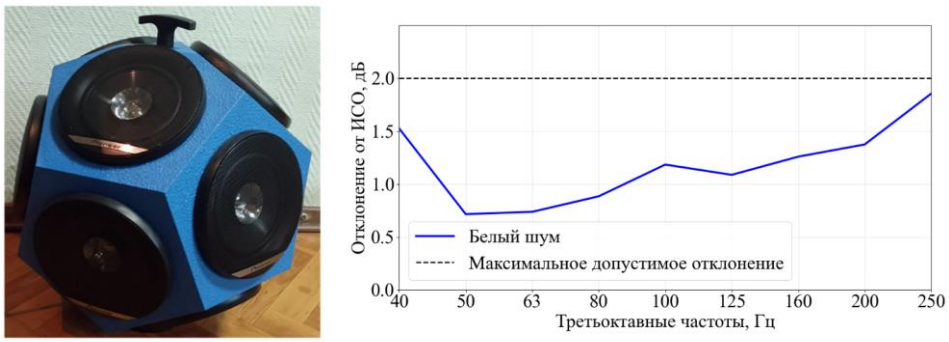


Рисунок 3 – Источник: (а) – фото источника, (б) – соответствие источника критериям ГОСТ ИСО 3745

На рис. 3, б приведены результаты измерения отклонений, согласно которым можно сделать вывод о том, что источник является ненаправленным в диапазоне 40–250 Гц.

3.2 Проверка камеры как полузаглушенного пространства

Для проверки акустического поля на первом этаже были выбраны пять траекторий с началом в акустическом центре излучателя и направленных в углы камеры. В предположении, что акустическое давление в точке обратно пропорционально расстоянию до источника, мы находим

расчётное значения акустического давления в точке r_i и вычисляем отклонение от экспериментального значения:

$$\Delta L_{pi} = L_{pi} - L_p\left(r_i\right),$$

где L_{pi} - экспериментальное значение, а $L_p\left(r_i\right)$ - теоретическое. Согласно [4] эта разница в каждой точке траектории не должна превышать заданного значения. На рис. 4 приведены результаты измерений, исходя из которых, можно сделать вывод о том, что поле на первом этаже заглушенной камеры является свободным и наличие низкочастотных собственных мод комнаты никак не влияет на качество проводимых измерений.

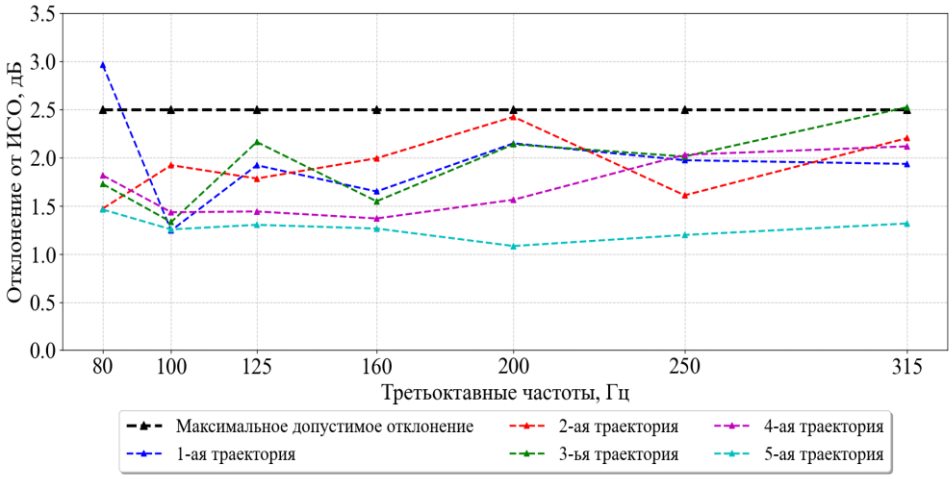


Рисунок 4 – Отклонение экспериментальных данных на первом этаже от критериев ГОСТ ИСО 3745 для полузаглушенной камеры

3.3 Проверка камеры как заглушенного пространства

Важным является вопрос: можно ли рассматривать третий этаж камеры, как полностью заглушенное пространство, в силу малого влияния отраженного от пола звука. Аналогично предыдущему пункту выбирается траектория, на которой проверяется условие свободного акустического поля. Результаты приведены на рис. 5.

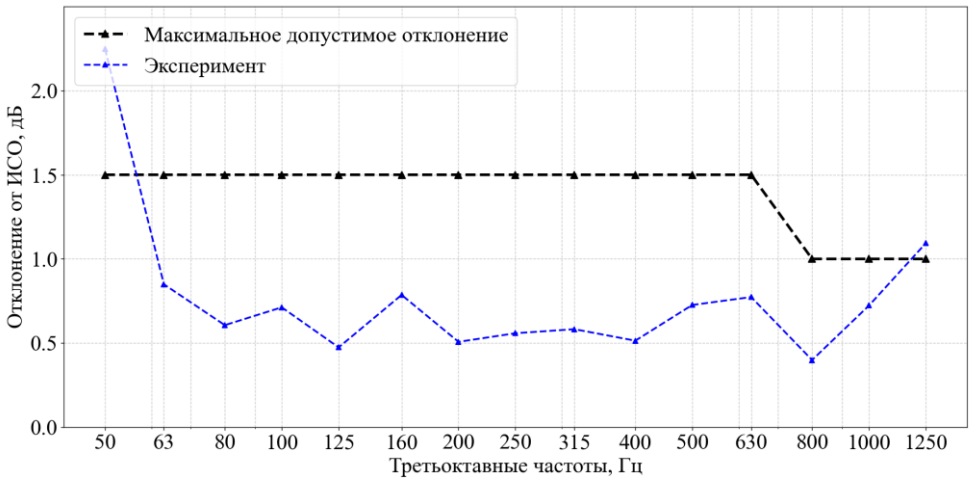


Рисунок 5 – Отклонение экспериментальных данных на третьем этаже от критериев ГОСТ ИСО 3745 для заглушенной камеры

Таким образом, становится ясно, что третий этаж камеры может рассматриваться как полностью заглушенное помещение.

4 Влияние отражения звука от пола на третьем этаже безэховой камеры

Ещё одни способом проверки того, что на третьем этаже можно пренебречь звуком, отражённым от пола, является оценка разности между прямым и отраженным звуками. Расположим в точке А источник, а в точке В микрофон (рис. 6, а). Генерируя импульсный сигнал, фиксируем микрофоном два импульса – дошедший напрямую от источника (первый импульс на рис. 6, б) и сначала отразившийся от пола (второй на рис. 6, б).

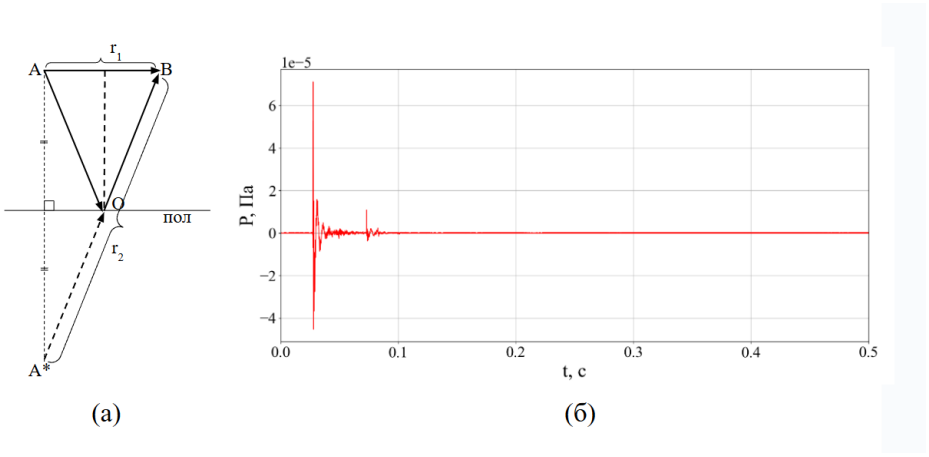


Рисунок 6 – Импульсный отклик от пола на третьем этаже: (а) – схема эксперимента, (б) – график импульсного отклика

С помощью формулы (1) для оценки разности звуков в дБ вычислили, что отражённый звук на 16.7 дБ тише, чем прямой звук.

$$\Delta L = 20\log\frac{P_2}{P_1} = -16.7 \text{ дБ} \quad (1)$$

Согласно [4] можно пренебречь дополнительным источником шума, если он тише основного хотя бы на 15 дБ. Таким образом, мы дополнительно убедились в том, что на третьем этаже можно не учитывать отраженный от пола звук и рассматривать третий этаж как полностью заглушенное помещение в соответствии с [4].

Заключение

В работе представлены результаты измерений акустических характеристик безэховой камеры НИИ строительной физики. Было установлено, что на третьем этаже камеры, расположенном на расстоянии 8 м от железобетонного пола, выполняются критерии заглушенного помещения согласно [10]. Данный результат был подтверждён двумя способами: измерением звука, отраженного полом, и проверкой условий свободного акустического поля. Таким образом, в низкочастотной области (63–250 Гц) заглушенная камера НИИСФ РААСН является полузаглушенным пространством на уровне пола и полностью заглушенным пространством на высоте 8 м.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-79-31027

Список литературы

1. *Beranek L.L., Sleeper Jr H.P.* The design and construction of anechoic sound chambers //The Journal of the Acoustical Society of America. – 1946. – Vol. **18**, N 1. – P. 140-150.
2. *Копьев В.Ф., Пальчиковский В.В., Беляев И.В., Берсенев Ю.В., Макашов С.Ю., Храмцов И.В., Корин И.А., Сорокин Е.В., Кустов О.Ю.* Создание заглушенной установки для аэроакустических экспериментов и исследование ее акустических характеристик. //Акустический журнал. – 2017. – Т. **63**, N 1. – С. 114-126
3. *R.W. Young, O.H. Schuck.* A novel, highly effective sound-absorbing arrangement and the construction of a dead room. //J. Acoust. Soc. Am. – 1941. – Vol. **13**. – P. 191-193.
4. ГОСТ ИСО 3745-2014. Акустика. Определение уровней звуковой мощности и звуковой энергии источников шума по звуковому давлению. Точные методы для заглушенных и полузаглушенных камер. – Введ. 01.11.2015. – М.: Стандартинформ, 2015. – 59 с.

УДК: 534.26, 51-73 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39601

Снижение шума ламельным экраном: лабораторный эксперимент

А.Р. Долгер[1,a], Н.Г. Канев[1,2,3,b]

[1] Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. г. Москва, Ярославское шоссе, 26.
[2] Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук. Локомотивный проезд, 21с4.
[3] Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана. 2-я Бауманская ул., 5, стр. 4.
E-mail [a]a.dolger@yandex.ru, [b]nikolay.kanev@mail.ru

Представлены результаты лабораторного экспериментального исследования снижения шума ламельным шумозащитным экраном. Эксперимент выполнен в заглушенной камере при воздействии широкополосного шума от стационарного источника. Приведены результаты оценки акустической эффективности ламельного экрана. Проанализировано влияние геометрических параметров ламелей на снижение уровней звукового давления в расчетных точках. Установлены зависимости акустической эффективности экрана от параметров его конструкции.

Ключевые слова: ламельный экран, шумозащитный экран, экранирование, лабораторный эксперимент, шумозащитная конструкция.

Noise reduction by a louvered type noise barrier: a laboratory experiment

A.R. Dolger[1,a], N.G. Kanev[1,2,3,b]

[1] Moscow State University of Civil Engineering. Moscow 129337, Russia.
[2] Scientific Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences. Moscow 127238, Russia.
[3] Bauman Moscow State Technical University. Moscow 105005, Russia.
E-mail [a]a.dolger@yandex.ru, [b]nikolay.kanev@mail.ru

The paper presents the results of a laboratory experimental study on noise reduction using a louvered type noise barrier. The experiment was conducted in a anechoic environment under broadband noise excitation from a stationary source. The acoustic performance of the noise barrier was evaluated. The influence of the geometric parameters of the louvers on the reduction of sound pressure levels at receiver points was analyzed. Dependencies of the acoustic efficiency of the barrier on its structural parameters were established.

Keywords: louvered-type noise barrier; noise barrier; noise shielding; laboratory experiment; noise control structure

PACS: 43.20.Fn

Введение

Проблема снижения шума от стационарных источников, таких как инженерное

оборудование, остаётся актуальной в связи с необходимостью выполнения санитарно-гигиенических требований и акустического комфорта. Одним из распространённых методов шумозащиты является применение шумозащитных экранов, обеспечивающих ослабление звукового поля за счёт отражения, дифракции и частичного поглощения звуковых волн [1-3]. Традиционные сплошные экраны обладают высокой эффективностью, однако их применение ограничено в случаях, когда необходимо обеспечить воздухообмен. В таких условиях используются ламельные экраны – конструкции с периодически расположенными наклонными пластинами, обеспечивающие сочетание продуваемости и шумозащиты [4].

Акустическая эффективность ламельных экранов определяется процессами отражения, дифракции, интерференции и частичного прохождения звука. Существенное влияние на характеристики экрана оказывают геометрические параметры конструкции, такие как шаг установки ламелей, угол наклона и их длина, а также наличие звукопоглощающих материалов внутри конструкции. При этом изменение геометрии позволяет варьировать как акустические, так и аэродинамические свойства экрана [5-6], что делает задачу их оптимизации многопараметрической и сложной.

Настоящая работа является экспериментальным исследованием акустической эффективности ламельного шумозащитного экрана в лабораторных условиях. Под эффективностью подразумевается разность уровней звукового давления без экрана и с ним. Эксперимент выполнен в заглушенном пространстве при воздействии широкополосного шума от стационарного источника. В рамках исследования проведён анализ влияния геометрических параметров ламелей на снижение уровней звукового давления и установлены зависимости акустической эффективности экрана от параметров его конструкции.

1. Постановка эксперимента

Экспериментальное исследование проводились в заглушенной камере акустического корпуса НИИСФ РААСН [7], что обеспечивало контролируемые условия распространения звуковых волн и минимизацию влияния отражений от ограждающих поверхностей.

Исследуемая конструкция – ламельный шумозащитный экран (Рис. 1) – представляет собой деревянную раму габаритами 2,0м по высоте и 1,2м по ширине, внутри которой размещены ламели (пластины), изготовленные из фанеры, шириной 0,2м, длиной 1,0м и толщиной 0,01м. Ламели устанавливались с постоянным шагом 0,2м, формируя периодическую решётчатую структуру.

Для обеспечения точности геометрических параметров экрана было разработано вспомогательное устройство, позволяющее синхронно изменять угол наклона всех ламелей, что обеспечивало идентичность угловой ориентации пластин. В процессе исследования ламели поворачивались как в сторону экрана (отрицательные углы), так и от него

(положительные углы), что позволяло оценить влияние направления наклона на акустическую эффективность конструкции. Рассматривался диапазон углов наклона ламелей от -80° до +80° с шагом 10°. Конструкция экрана была установлена на жёстком основании, выполненном в

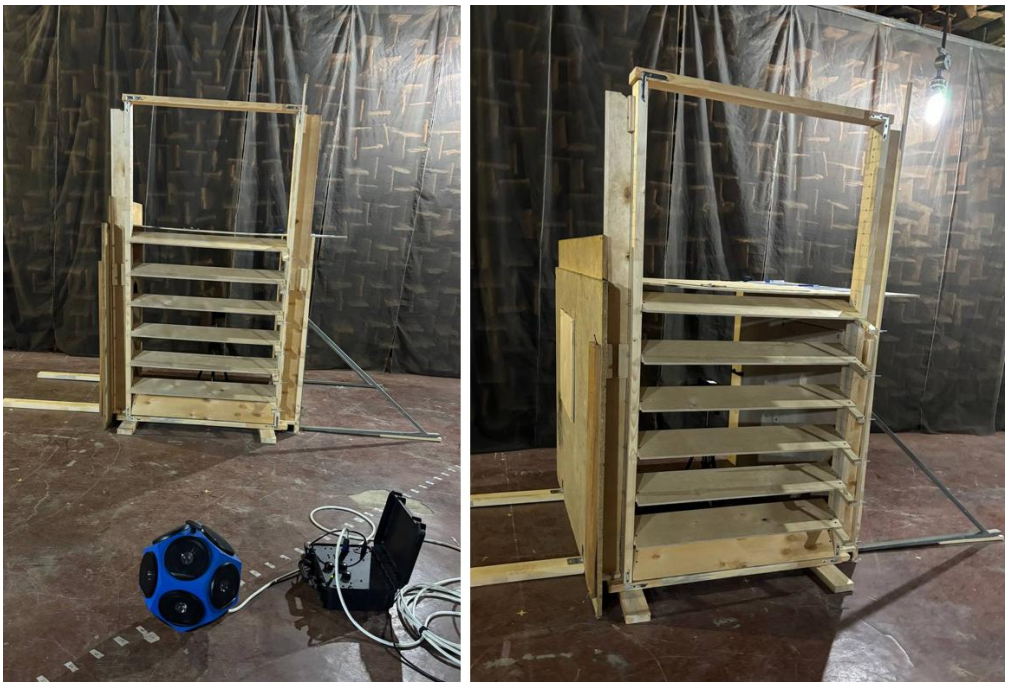


Рис. 1. Исследуемый шумозащитный экран ламельного типа

виде деревянных опор, обеспечивающих устойчивость и исключающих возможные колебания или опрокидывание установки в процессе эксперимента. С целью минимизации влияния краевой дифракции, возникающей на верхней и боковых кромках экрана, вокруг исследуемой конструкции была сформирована дополнительная ограждающая система в виде П-образного короба. Боковые стенки короба представляли собой сплошные щиты длиной 1,5м и высотой 1,35м, установленные по обе стороны экрана, а верхняя часть была перекрыта фанерным настилом. Такая конфигурация позволила минимизировать вклад дифракционных эффектов, огибающих кромку и стороны экрана. Расчётная схема установки приведена на рисунке 2.

В качестве источника звука использовался генератор широкополосного сигнала; в рамках настоящего эксперимента применялся розовый шум. Излучение осуществлялось с помощью всенаправленного источника звука (додекаэдра) модели OED-SP360, установленного перед экраном на уровне пола. Были выбраны две точки излучения, расположенные на расстоянии 1,0 м и 2,0 м от наружной плоскости экрана на высоте 0,1м. Измерения уровней звукового давления проводились в четырёх расчётных точках, расположенных за экраном – внутри защитного короба, с использованием шумомера (с функцией спектрального анализатора Signal+ 3G RTA). Точки наблюдения находились на расстояниях 0,4 м, 0,8 м, 1,2 м и 1,5 м от экрана (последняя точка соответствовала границе

перехода от зоны, ограниченной коробом, к свободному объёму заглушенной камеры). Все точки измерения за экраном были расположены на высоте 0,8м. В ходе экспериментальных

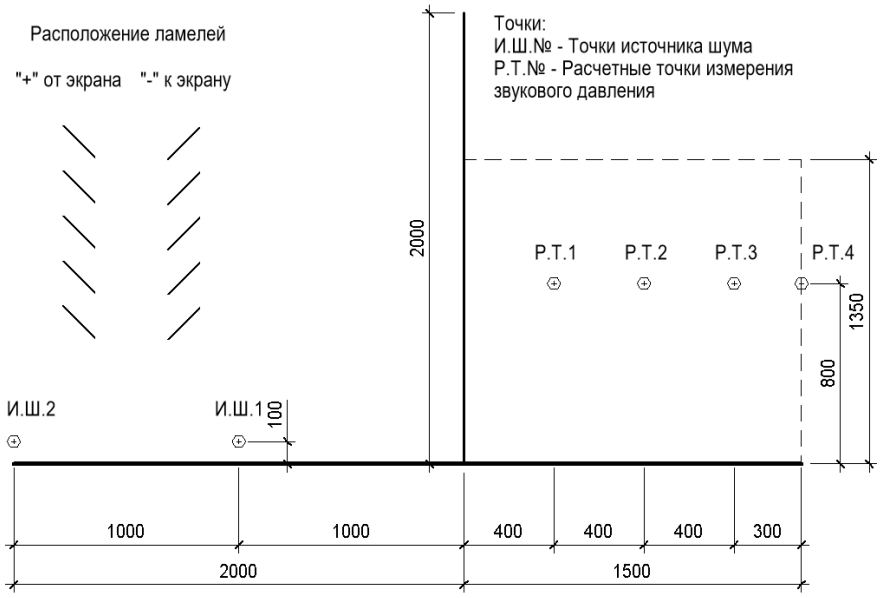


Рис. 2. Расчетная схема эксперимента (вид сбоку)

исследований было установлено, что изменение высоты расположения приёмных точек в пределах рассматриваемого диапазона не оказывает существенного влияния на значения уровней звукового давления, что позволяет считать результаты измерений репрезентативными для выбранной схемы расположения.

2. Результаты эксперимента

В результате проведённого эксперимента выполнено 156 измерений, на основании которых сформирован массив экспериментальных данных. Для последующего анализа были выделены основные октавные полосы частот: 63, 125, 250, 500, 1000 и 2000 Гц. Измерения проводились при двух положениях источника шума, расположенного перед экраном. Для анализа экспериментальных данных использовались результаты измерений, полученные в четырёх расчётных точках за экраном. Было вычислено их среднее арифметическое значение, что позволило усреднить результаты. Отдельные измеренные значения в указанных точках не демонстрировали существенных расхождений, поэтому применение процедуры усреднения являлось обоснованным. Результаты представлены в таблицах 1-2.

Таблица 1

Эффективность экрана (дБ) с источником шума в точке №1.

Угол поворота ламелей	Источник шума в точке №1								
	1 октава								
	63 Гц	125 Гц	250 Гц	500 Гц	1000 Гц	2000 Гц	4000 Гц	8000 Гц	16000 Гц
80	1,71	-0,09	0,66	2,75	3,83	7,05	10,33	10,98	9,24
70	0,07	1,23	2,94	0,60	2,75	6,29	9,61	9,94	9,99

Продолжение таблицы 1

60	0,27	-0,08	1,09	1,23	2,57	6,15	8,55	8,54	8,84
50	-0,09	-0,25	1,14	1,16	2,15	3,21	7,32	6,99	6,99
40	-0,22	-0,31	0,72	1,11	1,81	0,89	4,51	5,73	5,40
30	-0,34	-0,45	0,68	1,02	1,06	0,41	2,20	2,11	2,93
20	-0,28	-0,48	0,33	1,03	0,06	0,34	2,40	-0,08	2,36
10	-0,29	-0,51	0,34	0,75	-0,02	0,23	1,55	1,08	2,49
0	-0,67	-0,38	0,18	-0,11	-1,52	-0,07	2,34	0,39	1,85
-10	-0,32	-0,62	0,20	-0,45	-1,77	-0,22	2,42	-0,80	1,97
-20	0,12	-0,14	0,46	-0,48	-1,38	0,41	1,91	-0,02	0,94
-30	0,11	0,14	0,53	-0,77	-1,69	0,32	1,99	-0,16	1,72
-40	-0,16	-0,21	0,43	-1,23	-1,41	0,18	0,52	0,64	1,99
-50	0,05	0,08	0,58	-1,64	-1,54	0,48	1,01	1,19	2,02
-60	0,28	0,29	1,17	-1,55	-1,16	0,81	1,13	0,23	3,01
-70	0,78	0,73	1,56	-0,55	-0,54	0,89	3,41	2,74	3,32
-80	1,41	1,58	2,67	0,90	0,47	3,45	6,73	5,90	7,58

Таблица 2

Эффективность экрана (дБ) с источником шума в точке №2.

Угол поворота ламелей	**Источник шума в точке №2**								
	1 октава								
	63 Гц	**125 Гц**	**250 Гц**	**500 Гц**	**1000 Гц**	**2000 Гц**	**4000 Гц**	**8000 Гц**	**16000 Гц**
80	1,49	1,10	2,77	3,28	1,98	6,74	12,17	10,52	7,44
70	1,17	0,96	2,57	3,04	1,25	6,07	10,41	10,38	6,31
60	1,10	0,70	1,88	2,10	0,01	5,44	7,71	8,46	6,31
50	0,83	0,48	1,78	1,64	-0,68	2,25	6,72	4,96	4,65
40	0,62	0,36	1,43	1,14	-1,29	0,61	2,42	0,36	3,94
30	0,58	0,28	1,15	0,99	-1,44	0,34	1,85	0,29	1,74
20	0,43	0,48	1,05	1,21	-2,19	0,54	1,95	-0,42	2,78
10	0,46	0,33	1,14	1,04	-2,34	0,60	1,30	0,86	2,63
0	0,72	0,40	1,07	0,83	-2,63	1,17	0,56	-0,69	2,32
-10	0,67	0,50	0,99	0,56	-2,90	0,87	0,63	-0,92	1,57
-20	0,74	0,68	1,06	0,53	-2,95	0,16	0,40	-0,04	1,68
-30	0,84	0,78	1,21	0,61	-3,20	-0,05	0,26	0,78	1,57
-40	0,94	0,75	1,43	0,56	-3,35	-0,04	0,25	0,99	2,33
-50	1,12	1,08	1,58	0,69	-3,13	-0,59	0,80	1,64	1,64
-60	1,10	1,38	1,88	0,80	-3,09	0,09	-0,61	1,60	1,03
-70	2,37	2,54	3,34	3,11	0,11	2,46	4,86	6,46	4,44
-80	1,67	1,75	2,96	3,14	0,92	5,69	7,74	6,42	6,59

Заключение

Для обоих положений источника шума (точки №1 и №2) наибольшая акустическая эффективность ламельного экрана наблюдается в области высоких частот (2000–16000 Гц) и при углах наклона ламелей более ±50°; смещение ламелей в положительном направлении (от экрана), приводит к повышению эффективности. В диапазоне частот 63-1000 Гц наблюдается заметное снижение эффективности. Установлено влияние положения источника шума по высоте: при его расположении вблизи поверхности пола эффективность экрана ниже, тогда как при подъёме источника на высоту порядка 1/3-1/2 высоты экрана она возрастает при неизменных параметрах конструкции. Ламельный экран демонстрирует наибольшую акустическую эффективность в области высоких частот, преимущественно при положительных углах наклона ламелей (от экрана). Полученные результаты подтверждают возможность повышения эффективности конструкции при оптимизации геометрических параметров. Также в следующих работах необходимо рассмотреть шаг и ширину ламелей.

Список литературы

1. Иванов Н.И., Семенов Н.Г., Тюрина Н.В. Расчет и конструирование акустических экранов для снижения шума в жилой застройке // Жилищное строительство. – 2013. – № 6. – С. 10–12.
2. Тюрина Н.В. Расчет и проектирование акустических экранов для снижения шума стационарных источников шума // Сборник трудов конференции 13-го международного конгресса по звуку и вибрации 2006, ICSV 2006, Вена, 02–06 июля 2006 года. Том 2. – С. 1615–1618.
3. Тюрина Н.В., Минина Н.Н., Шашурин А.Е., Гогуаце М.Г. Экспериментальные исследования шумозащитных экранов // Сборник трудов 26-го международного конгресса по звуку и вибрации, ICSV 2019, Монреаль, 07–11 июля 2019. – Канадская Акустическая Ассоциация. 2019.
4. Бужинский К.В., Андрющенко А.К., Фиев К.П., Тюрина Н.В., Кондратьев С.А. Практические решения по снижению шума чиллеров и драйкулеров // *Noise Theory and Practice*. 2025. Т. 11. № 4. С. 260–266. ISSN 2412-8627.
5. Долгер А. Р., Канев Н. Г. Численное моделирование шумозащитных экранов ламельного типа // Сборник трудов, посвященных памяти академиков РААСН В. М. Бондаренко и Г. Л. Осипова: материалы Междунар. науч.-практ. конф. (Москва, 1–3 июля 2025 г.) / Науч.-исслед. ин-т строительной физики РААСН, НИУ МГСУ; сост. А. Н. Воздков. — Москва: НИИСФ РААСН, 2025. — С. 202–207. — ISBN 978-5-902630-23-4.
6. Канев Н. Г., Долгер А. Р. Снижение шума экраном в виде решетки твердых пластин // Строительство и реконструкция. – 2025. – № 4 (120). – С. 14–21 DOI: 10.33979/2073-7416-2025-120-4-14-21
7. Бикмухаметов Ф.Р., Канев Н.Г. Безэховая звукомерная камера НИИ строительной физики: актуальные акустические характеристики // Noise Theory and Practice. – 2026. – Т. 12, № 1. – С. 7–17. — DOI: 10.56408/2412-8627.2026.1.12.001.

УДК: 534.84 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39602

Устойчивый метод ГИУ для расчета собственных частот в областях с углами с приложением к акустике малых помещений

М.А. Сумбатян[1,a]

[1] *Южный федеральный университет. Ул. Мильчакова 8а, г. Ростов-на-Дону, 344090*

E-mail: [a] *sumbatma@mail.ru*

Аннотация: Исследуется задача о звуковых волнах в трехмерной области, граница которой может иметь острые углы. В этой ситуации, метод граничных интегральных уравнений (ГИУ) теряет устойчивость возле углов. В данной работе, подразумевая приложение к акустике малых помещений, рассматривается такая геометрия, в которой пол и потолок – горизонтальные, а все стены вертикальные. Показано, что в этом частном случае трехмерная задача может быть сведена к двумерной задаче в области, возникающей «в плане». При этом предлагается метод, который приводит к устойчивым вычислениям.

В рамках критерия Бонелло для качества звучания в малых помещениях, рассчитываются модальные частоты в области 20 – 200 Гц. Данный критерий требует, чтобы в рассматриваемом диапазоне число модальных частот в треть-октавных интервалах не убывало. Показывается, что для улучшения акустических свойств малых студий можно использовать скос вертикальных стен.

Ключевые слова: граничное интегральное уравнение, модальные частоты, акустика малых помещений.

A stable BIE method for calculating natural frequencies in areas with corners, with application to small-room acoustics

M.A. Sumbatyan[1,a]

[1] *Southern Federal University, Milchakova Street 8a, Rostov-on-Don, 344090*

E-mail: [a] *sumbatma@mail.ru*

Abstract: In the present work, we study sound waves in a three-dimensional domain whose boundary may have sharp corners. In this situation, the boundary integral equation (BIE) method loses its stability near the corners. In this paper, with application to small-room acoustics in mind, we consider a geometry in which the floor and ceiling are horizontal, and all walls are vertical. It is shown that in this particular case, the three-dimensional problem can be

reduced to a two-dimensional wave problem in a domain occurring "in plan." A method leading to stable calculations is proposed.

Using Bonello's criterion for sound quality in small spaces, modal frequencies in the range of 20–200 Hz are calculated. This criterion requires that the number of modal frequencies in one-third-octave intervals within the range under consideration be non-decreasing. It is shown that sloping vertical walls can improve acoustic properties of small studios.

Keywords: boundary integral equation, modal frequencies, small room acoustics.

PACS: 43.55.-n

Введение

Различные аналитические и численные методы являются эффективными в задачах акустики замкнутых пространств. Одним из них является метод Граничных Интегральных Уравнений (ГИУ) [1], который в дискретной форме иногда называют Метод Граничных Элементов (МГЭ) [2]. Преимущество метода ГИУ заключается в том, что он уменьшает размерность задачи на единицу. Однако метод ГИУ может терять устойчивость в малой окрестности острых углов, типичных для помещений со скошенными стенами, как показано, например, на рис. 1.

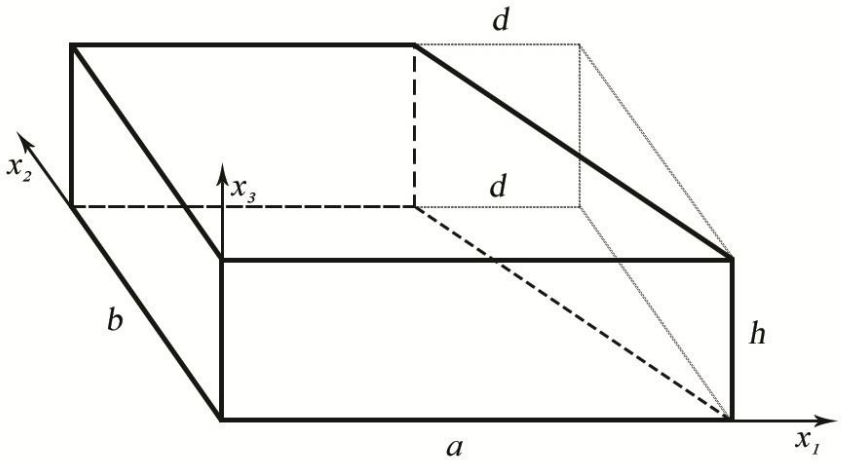


Рис. 1. Малое помещение со скосом вертикальных стен.

Применительно к акустике малых помещений ключевым является расчет низких модальных частот замкнутой трехмерной многогранной области, как простейшей модели помещения. На практике важно знать эти частоты ниже 200 Гц, обычно это – до 150 частот. В [3] показано, что стандартные численные методы (конечные элементы, конечные разности) не обеспечивают требуемой точности. Поэтому в [3] был предложен

метод Галеркина, в котором относительная погрешность при вычислении первых 150 мод не превышает $5\cdot10^{-4}$. Это позволяет отделить соседние частоты друг от друга.

Здесь предлагается альтернативный подход, основанный на методе ГИУ для геометрии с горизонтальными полом и потолком и вертикальными стенами со скосом. Пример показан на рис. 1 для случая одной скошенной стены. Рассчитанные модальные частоты используются в критерии Бонелло [4] оценки качества звучания малых помещений по распределению модальных частот от 20 до 200 Гц. Согласно этому критерию, для хорошего звучания нужно, чтобы число модальных частот в последовательных 1/3-октавных полосах было неубывающей последовательностью. Поскольку выше 180 Гц последовательность собственных частот в 1/3-октавных полосах обычно автоматически возрастает из-за их плотного распределения в этом диапазоне, ограничимся рассмотрением десяти 1/3-октавных полос, от (18 – 22.4) до (140 – 180) Гц.

1 Предлагаемый метод

Если граничная поверхность S рассматриваемой трехмерной области является акустически твердой, то задача в гармоническом режиме может быть сведена к уравнению Гельмгольца для акустического давления с однородным граничным условием Неймана:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x_1^2}+\frac{\partial^2 p}{\partial x_2^2}+\frac{\partial^2 p}{\partial x_3^2}+k^2 p=\delta(x_1-x_1^0)\delta(x_2-x_2^0)\delta(x_3-x_3^0),\qquad \left.\frac{\partial p}{\partial n}\right|_S=0. \tag{1}$$

Здесь полное давление представляет собой сумму волны p_0, генерируемой точечным источником звука, расположенным внутри области в точке x_0, и рассеянным волновым полем: $p=p_0+p^{sc}$. Зависимость от времени вводится через множитель $e^{-i\omega t}$, а каждая трехмерная точка определяется своими декартовыми координатами: $x=(x_1,x_2,x_3)$.

Если потолок и пол являются плоскими и горизонтальными, то решение уравнения (1) внутри многогранника дается тригонометрическим рядом по вертикальной координате:

$$p(x_1,x_2,x_3)=\sum_{q=0}^{\infty} p_q(x_1,x_2)\cos\frac{\pi q x_3}{h}, \tag{2}$$

каждый член которого автоматически удовлетворяет однородному условию Неймана на горизонтальных поверхностях пола (при $x_3=0$) и потолка (при $x_3=h$). Подстановка (2) в (1), в силу ортогональности тригонометрических функций, приводит к уравнению:

$$\frac{\partial^2 p_q}{\partial x_1^2}+\frac{\partial^2 p_q}{\partial x_2^2}+k_q^2 p_q=\alpha_q\delta(x_1-x_1^0)\delta(x_2-x_2^0)\cos\frac{\pi q x_3^0}{h}=F_q(x_1,x_2),\qquad \left.\frac{\partial p}{\partial n}\right|_\ell=0. \tag{3}$$

$$k^2 = k_q^2 + \left(\frac{\pi q}{h}\right)^2, (q = 0,1,...); \quad \alpha_0 = \frac{1}{h}, \quad \alpha_q = \frac{2}{h}, (q = 1,2,...), \tag{4}$$

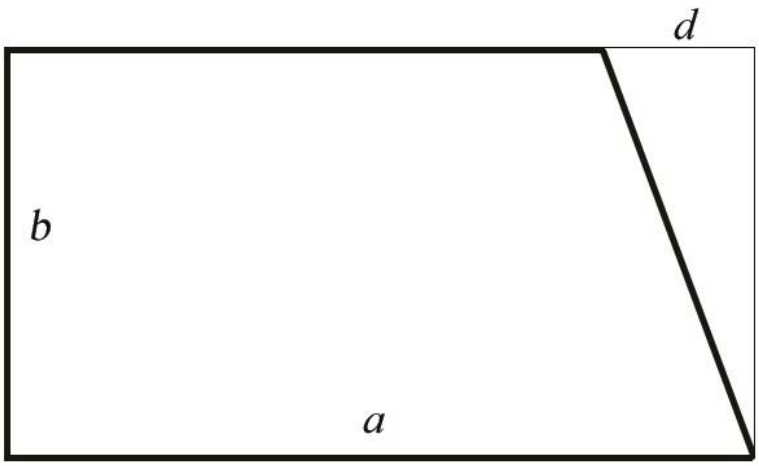


Рис. 2. Двумерный вид «в плане» трехмерной области, показанной на рис. 1.

Если набор критических частот k_q^* для двумерной области «в плане» удастся найти тем или иным методом, то набор модальных частот k^* для исходной трехмерной области легко пересчитывается по формуле (4).

2 Решение двумерной задачи методом ГИУ

В дальнейшем все точки считаются двумерными: $x = (x_1, x_2)$, $y = (y_1, y_2)$, и т.д. Периметр двумерной области обозначим ℓ. Если волновое число k_q двумерной задачи для области «в плане» не совпадает с критической, то двумерная краевая задача (3) эквивалентна ГИУ следующего вида [1]:

$$\frac{p_q(x)}{2} + \int_\ell K(y,x) p_q(y) d\ell_y = F_q(x), \quad (x \in \ell). \tag{5}$$

$$K(y,x) = \frac{ik_q(\mathbf{r}\cdot\mathbf{n}_y)}{4r} H_1^{(1)}(k_q r), \quad \mathbf{r} = y - x, \quad r = |\mathbf{r}| = \sqrt{(y_1 - x_1)^2 + (y_2 - x_2)^2}. \tag{6}$$

Заметим, что коэффициент при первом члене в (5) равен 1/2 только в случае, когда точка $x \in \ell$ попадает на гладкую часть контура. Если точка x попадает в угол, то значение этого коэффициента будет другим и зависит от величины угла.

Очевидно, частота становится модальной (из счетного множества значений волнового числа), когда уравнение (5) с ядром (6) неразрешимо. Для расчетов перейдем к дискретизации. Если граничный контур ℓ – многоугольник, то каждая его сторона ℓ_s

может быть разбита на N_s малых интервалов равной длины $\varepsilon_s = \ell_s / N_s$. Пусть размерность всей граничной сетки равна N. Разместим множество узлов сетки y^j в центре каждого малого интервала (a_j, b_j) длиной ε_j: $y^j = (a_j + b_j)/2$, и положим в (5) $x = y^m \in \ell$, $(m = 1, ..., N)$. Заменяя в (5) интеграл по малым интервалам на сумму, например, по формуле Симпсона, приходим к СЛАУ следующего вида (δ_{mj} – символ Кронекера):

$$\int_\ell K(y, y^m) p_q(y) d\ell_y \approx \sum_{j=1}^{m} b_{mj} p_j, \quad \Rightarrow \qquad \sum_{j=1}^{m} a_{mj} p_j = F_q(y^m), \tag{7}$$

$$p_j = p_q(y^j), \quad b_{mj} = \frac{\varepsilon_j}{6}\Big[K(a_j, y^m) + 4K(y^j, y^m) + K(b_j, y^m)\Big], \quad a_{mj} = \frac{\delta_{mj}}{2} + (1 - \delta_{mj}) b_{mj}, \tag{8}$$

Повышение эффективности метода достигается улучшением его поведения вблизи углов многоугольника ℓ. Этот подход связан с разложением функции Ханкеля в (6) в окрестности нуля и апробирован в недавних работах автора с коллегами [5,6].

3 Приложение в акустике малых помещений

Как показано выше, собственные частоты 2D задачи «в плане» соответствуют тем значениям параметра k_q, для которых матрица a_{mj} в (7) вырождена, т.е. когда ее число обусловленности (CN) теоретически бесконечно, а при численных расчетах – велико. Поэтому достаточно пройти по значениям параметра $k_q = 2\pi f / c$ в низкочастотном диапазоне, скажем, с шагом 0,01 Гц для частоты f, каждый раз вычисляя CN и фиксируя частоты с резкими максимумами параметра CN. Затем для каждого критического волнового числа 2D задачи можно вычислить все критические значения 3D волнового числа k по формуле (4) при $q = 0, 1, 2, \ldots$. К ним нужно добавить величины k из (4) при $k_q = 0$ и $q = 1, 2, \ldots$. При этом параметр CN может быть рассчитан в рамках метода исключения Гаусса для СЛАУ (7) с матрицей (8).

В качестве примера рассмотрим параллелепипед с размерами $a = 8$ м, $b = 5$ м, $h = 3$ м, с различными значениями параметра скоса d (рис. 1,2). Примем скорость звука $c = 340$ м/с. Расчеты проводились для трех значений $d = 0.5, 1.0, 1.5$ м. В исходной геометрии без скоса ($d = 0$) набор модальных частот легко выписывается в явном виде, и их количество в распределении по десяти 1/3 октавным полосам, от (18 – 22.4) до (140 – 180) Гц, имеет следующий вид: 1,0,1,2,1,7,7,14,27,52. Очевидно, здесь критерий не-убывания значений Бонелло нарушается два раза: между 1-й и 2-й, а также между 4-й и

5-й полосами. Оказалось, что из выбранных трех значений скоса наилучшее значение $d = 1.0$ м. Для него распределение по десяти 1/3 октавным полосам имеет следующий вид: 0,1,1,1,1,7,8,12,28,56. Очевидно, последовательность этих чисел – возрастающая.

Заключение

Предложенный в работе метод расчета низких модальных частот, необходимых для проверки критерия Бонелло, в оценке акустических свойств малых студий, работает в реальном масштабе времени на персональном компьютере. На тестовых примерах он показывает точность с относительной погрешностью, не превышающей $1 \cdot 10^{-4}$, что в 5 раз лучше, чем в методе Галеркина [3]. При этом время расчетов также сокращается примерно в 5 раз.

Данный метод можно также использовать на практике для проверки того, приведет ли запланированный скос вертикальных стен к улучшению акустики. При расчетах малых музыкальных студий автор сталкивался с ситуацией, когда скос стен не улучшает распределение низких частот. Без проведения расчетов влияние скосов оценить сложно.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), проект № 25-21-00139, в Южном федеральном университете.

Список литературы

1. *Колтон Д., Кресс Р.* Методы интегральных уравнений в теории рассеяния. Мир. М., 1987.

2. *Бреббия К., Теллес Ж., Вроубел Л.* Методы граничных элементов. Мир. М., 1987.

3. *Sumbatyan M.A., Lannie M.Y., Zampoli V.* A fast Galerkin-based method for eigenfrequencies in acoustics of small rooms with slanted boundary planes. // J. Sound & Vibration. 2016. **367**. P. 101-113.

4. *Bonello O.* A new criterion for the distribution of normal room modes // J. Audio Engineering Society. 1981. **29**, N 9. P. 597-606.

5. *Sumbatyan M.A., Martynova T.S., Musatova N.K.* Boundary element methods in diffraction of a point-source acoustic wave by a rigid infinite wedge // Engineering Analysis with Boundary Elements. 2021. **125**. P. 157-167.

6. *Sumbatyan M.A., Titarenko E.A.* Development of the boundary equations method for wave problems in 2D domains with irregularities of the boundary curve // Advanced Structured Materials. 2025. **223**. P. 675-686.

УДК: 534.843.26. DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39603

Специфика распределения энергии ранних отражений в залах театров советского модернизма

Шевцов С.Е.[1)2)]

[1)] *НИИСФ РААСН, город Москва;*

[2)] *Российский институт театрального искусства - ГИТИС, город Москва*

Тел.: +7(925)124-4502;

E-mail: s_shevtsov@mail.ru

В статье представлен анализ измеренных данных советских театров постройки 1970-2000 гг. За счет специальной формы профиля потолка и стен, энергия ранних отражений во второй – дальней половине зрительских мест доминирует над центральной частью, что отражается на сравнительной субъективной оценке звучания. Выводом анализа является следование принципу выравнивания энергии путём соответствующей проработки формы поверхностей и их звукоотражающих свойств.

Ключевые слова: акустические параметры концертных залов и театров

The specifics of energy distribution in early reflections in theaters of Soviet modernism

Shevtsov S.E.[1)2)]

[1)] *Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences, Moscow (NIISF RAASN);*

[2)] *Russian Institute of Theatre Arts (GITIS), Moscow*

Phone: +7(925)124-4502;

E-mail: s_shevtsov@mail.ru

The article presents an analysis of the measured data of numerous Soviet theaters built in the 1970s and 2000s. Due to the special shape of the ceiling and wall profiles, the energy of early reflections in the second and far-reaching half of the auditorium dominates over the center section, which affects the subjective perception of sound quality. The analysis concludes that the principle of energy alignment can be achieved by carefully designing the surface shapes and their sound-reflecting properties.

Keywords: acoustic parameters of concert halls and theaters

PACS: 43.55.Dt

Введение

В период с 1970-х вплоть до 2000 гг. было построено большое количество театров и домов культуры в стиле советского модернизма. Этот стиль представляет собой прорыв в

театральной архитектуре. Капитальная конструкция подвесного потолка и выступов на стенах решала две задачи:

- сокрытие осветительных устройств, расширение их мест установки и фокусирование внимания зрителей на сцене;
- распределение ранних отражений на дальней части зрительских мест.

1. Особенности распределения энергии ранних отражений

Поскольку типовые размеры большинства залов относительно небольшие, расстояние от сцены до последнего ряда партера составляет порядка 10 м. В этой связи потеря энергии в прямой волне от естественных источников звука (голосов артистов, музыкантов) мала, поэтому разборчивость речи и ясность звучания музыки представляют собой положительные показатели, см. рис 1.

По этой причине данная часть зрительской зоны не нуждается в компенсации потерь прямого звука ранними отражениями. Контуры потолка и боковых участков стен, собственно, полноценно и не обеспечивают ими данную зону, см. рис 2.

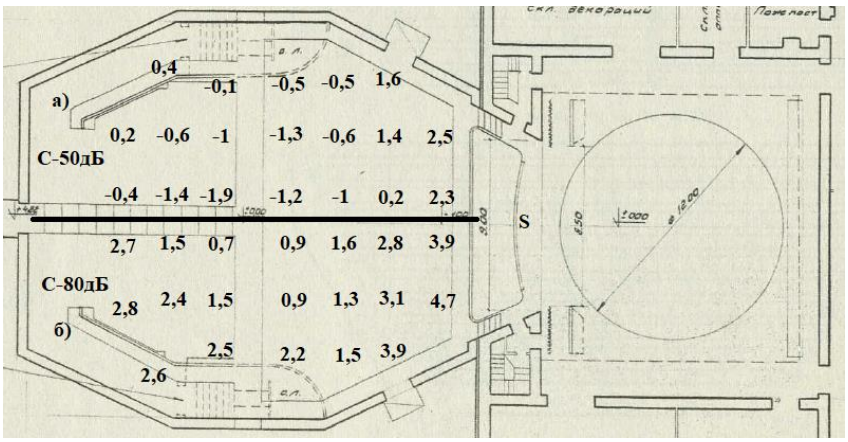


Рисунок 1. Пример распределения показателей а) С-50дБ и б) С-80дБ при местоположении источника на авансцене в полосе частот шириной 250-2000 Гц для типового советского театра.

Начиная с середины зала и до последнего ряда, потери прямой волны уже существенны, а энергия поздних отражений возрастает, что соответствует акустическому отношению > 1. Для компенсации данных потерь, контуры потолка и боковых стен создают сильные ранние отражения, направленные именно во вторую половину зрительских мест. Это обстоятельство вызывает рост показателей таких параметров, как С-50 и особенно С-80 в сторону положительного доминирования в последней трети от общей площади зрительских мест, ближе к стенам, см. рис 1,2.

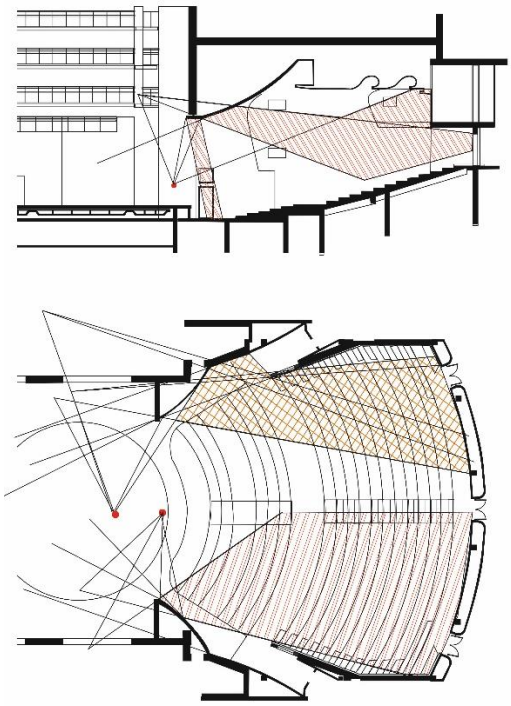


Рисунок 2. Пример распределения направлений ранних отражений в советском модернистском театре [1].

При этом, повторим, в партере показатели сохраняют положительные значения. Поскольку характер субъективного восприятия человеком звука во многом носит сравнительный характер, то зрители, а по большей части сами работники театра, чувствуя разницу в звучании на дальних и ближних местах, оценивают последние как «плохие» начиная с середины партера и далее к центру. Порог чувствительности критериев показывает способность хорошо различать разницу, см табл. 1.

Таблица 1

Минимальный порог изменения ощущения критерия [2]

Субъективный критерий	Объективный параметр	Частотный диапазон (Гц)	порог
Ясность, четкость	C80дБ	500-1000	1дБ

2. Регулирование распределения энергии ранних отражений

Для более равномерного распределения энергии ранних отражений и балансирования субъективной оценки, возможными способами являются:

- повышение энергии ранних отражений в районе геометрического центра зала, используя поворот отражающих плоскостей стен и потолка на соответствующий угол;

- некоторое снижение доли энергии ранних отражений в последней трети зала путём понижения звукоотражающих свойств поверхностей потолка и стен;
- небольшое уменьшение площади поверхностей, ориентированных на дальнюю часть зала.

3. Целесообразность стремления равномерного распределения энергии ранних отражений

Следует считать, что приведённые выше наблюдения были ожидаемы и известны авторам конфигурации этих объектов. Вероятно, их подход нужно рассматривать со следующей точки зрения: равномерность акустических показателей (за исключением их частотной характеристики) не является необходимостью. Разные свойства звукового поля в пространстве принимаются как естественное условие. Основная задача – достижение приемлемых характеристик разборчивости речи и ясности музыки на всех местах, пусть и с разными показателями.

Вывод

В работе представлена неравномерность распределения показателей индексов C-50 и C-80 на зрительских местах в театрах советского модернизма. Итогом анализа является следование принципу выравнивания энергии путём соответствующей «настройки» поверхностей и их звукоотражающих свойств. Но, исходя из других соображений, остаётся открытым вопрос: являются ли указанные в статье свойства проблемой.

Список литературы

1. С.Е. Шевцов. Акустика музыкальных театров Урала. XXXV Сессия РАО, г. Москва, 2023 г.
2. Michael Vorländer. Auralization. Fundamentals of acoustics, modelling, simulation, algorithms and acoustic virtual reality. First edition. ISBN 978-3-540-48829-3. © 2008 Springer-Verlag Berlin Heidelberg

УДК: 534.62 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39604

Неопределенность измерения коэффициента звукопоглощения и расчета времени реверберации помещений

Н.Г. Канев

[1] *НИИСФ РААСН, Москва*

[2] *НИУ МГСУ, Москва*

[3] *Акустический институт им. акад. Н.Н. Андреева, Москва*

4 *МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва*

E-mail: nikolay.kanev@mail.ru

Сегодня известно несколько подходов для расчета времени реверберации помещений, среди которых есть как стандартные аналитические методы, так и численное моделирование. Однако, в практике акустического проектирования не принято давать в каком-либо виде оценку точности расчета, что в свою очередь не позволяет корректно использовать результаты расчета при сравнении с данными натурных измерений. Сложившаяся ситуация является существенным пробелом, снижающим качество проектирования. В настоящей работе обсуждаются вопросы, связанные с источником неопределенности исходных данных для расчета, а также неопределенности, связанные с применяемой расчетной методикой. Приводятся данные по оценке неопределенности измерений коэффициента звукопоглощения, проводимых в звукомерной камере НИИСФ РААСН, приводятся примеры расчета параметров неопределенности при использовании классических формул Сэбина-Эйринга.

Ключевые слова: архитектурная акустика, акустическое проектирование, реверберационная камера.

Uncertainty of measuring the sound absorption coefficient and calculating the reverberation time of rooms

N.G. Kanev

[1] *Research Institute of Building Physics, Moscow*

[2] *Moscow State University of Civil Engineering, Moscow*

[3] *Andreyev Acoustic Institute, Moscow*

[4] *Bauman Moscow State Technical University, Moscow*

E-mail: nikolay.kanev@mail.ru

Today, there are several approaches known for calculating the reverberation time of rooms. These include both standard analytical methods and numerical modeling. However, it is not common in the

practice of acoustic design to provide an assessment of the accuracy of these calculations in any form. This, in turn, does not allow for the correct use of calculation results when comparing them with data from field measurements. This situation creates a significant gap in the quality of acoustic design. The paper discusses issues related to the sources of uncertainty in the initial data used for calculations, as well as uncertainties associated with the applied calculation methodologies. It presents data on the estimation of measurement uncertainty for the sound absorption coefficient measured in the sound measurement chamber of the National Institute for Building Research and Design (NIISF) of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAASN). Examples of calculating uncertainty parameters using the classical Sabin-Eyring formulas are also provided.

Keywords: room acoustics, acoustic design, reverberation chamber

PACS: 43.55.Ev

Введение

Одной из прикладных задач архитектурной акустики является разработка проектного решения помещений, обеспечивающего необходимые акустические условия в них. Важным этапом проекта является расчет акустических параметров помещения, который выполняется аналитически или с помощью численного моделирования. Очевидно, что на результат расчета оказывают влияние факторы неопределенности различной природы, поэтому было бы полезно давать оценку точности расчета в виде некоторого диапазона значений, например, доверительного интервала. Однако, ни на практике проектирования, ни в нормативно-методической литературе такой подход не применяется и не рассматривается.

Из опыта проектирования и строительства помещений различного назначения известно, что расчетные акустические параметры помещения зачастую отличаются от измеренных в реальном помещении после окончания строительства. Любопытный пример приводят авторы акустического решения нового концертного зала в Нижнем Новгороде [1]. Время реверберации построенного зала оказалось ниже расчетных значений на 30-35% в диапазоне 125-500 Гц. Авторы предположили, что одной из причин такого расхождения является некачественный монтаж декоративных обшивок зала. В лабораторных условиях были смоделированы элементы обшивок с дефектами монтажа, и было получено отклонение коэффициента звукопоглощения от проектного значения. Данный фактор позволил объяснить разницу между расчетным и фактическим значением времени реверберации зала лишь в 5%, таким образом, ключевые причины несоответствия акустики зала проекту остались неизвестными. Если бы на этапе проекта была дана оценка точности расчета, то это позволило бы установить, насколько допустимыми и ожидаемыми являются полученные отклонения.

В настоящей работе поднимается вопрос о точности результатов акустических расчетов, используемых при проектировании помещений различного назначения.

Анализируются причины неопределенности расчета времени реверберации, и приводятся примеры неопределенности исходных данных.

1 Источники неопределенности

Неопределенность расчета времени реверберации и других акустических параметров главным образом определяется двумя факторами: неопределенностью исходных данных и неопределенностью, вносимой методикой расчета, поскольку любая методика описывает физический процесс распространения звука в помещении с той или иной степенью точности.

Исходные данные задаются объемно-планировочным решением помещения и акустическими характеристиками отделочных материалов. На современном уровне архитектурного проектирования геометрические характеристики помещения известны с высокой точностью: методы моделирования позволяют любую геометрию помещений. В то же время акустические характеристики, в первую очередь коэффициент звукопоглощения, определяемый в условия лабораторного эксперимента, имеют некоторую неопределенность, обусловленную точностью методики измерений. Таким образом, в первом приближении неопределенность исходных данных сводится к неопределенности коэффициента звукопоглощения.

Оценка неопределенности, вносимой приближенностью аналитической или численной модели, используемой для расчета, не столь очевидна. Например, известная формула Сэбина для расчета времени реверберации более или менее надежно работает в помещении с диффузным звуковым полем. Малейшие отклонения от диффузности приводят к отличию расчета и измерений. Это определило появление большого количества альтернативных методик расчета времени реверберации: сегодня их насчитывается несколько десятков [2]. Вместе с тем, в литературе не приводятся систематические исследования неточности применяемых моделей, хотя с практической точки зрения такие оценки весьма востребованы.

2 Неопределенность измерения коэффициента звукопоглощения

Стандартная методика экспериментального определения коэффициента звукопоглощения [3] предполагает измерение времени реверберации в специальном помещении – реверберационной камере. Одно измерение проводится в пустой камере, а второе – с испытуемым образцом. По результатам двух измерений рассчитывается коэффициент звукопоглощения.

Измерения проводятся в шести точках при двух расположениях ненаправленного источника звука, что дает двенадцать значений времени реверберации для каждого измерения. Характерный разброс полученных значений представлен на рис. 1. Сплошные кривые представляют среднее по двенадцати измерениям, пунктирный – разброс значений в виде минимальных и максимальных значений. Синие кривые – измерения в пустой камере,

оранжевые – в камере с испытуемым образцом (минераловатная плита толщиной 100 мм). Из графиков следует, что дисперсия измеренных значений уменьшается с частотой.

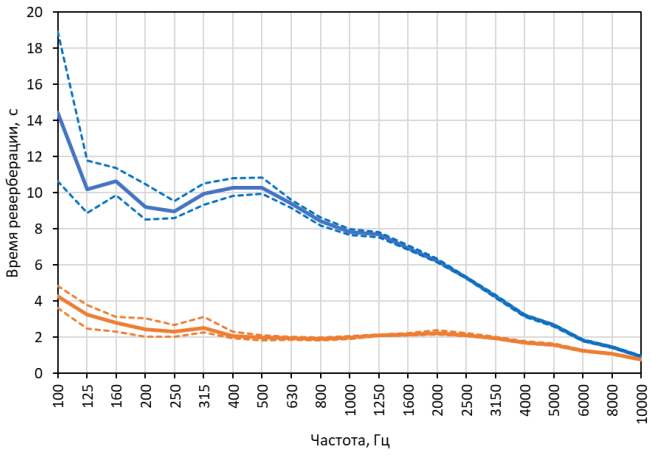


Рис. 1. Результаты измерения времени реверберации в пустой камере (синие кривые) и в камере с образцом звукопоглощающего материала (оранжевые кривые)

Стандарт [3] вводит следующую метрику относительной неопределенности

$$\frac{\varepsilon}{T} = \sqrt{\frac{2.42 + 3.59/N}{fT}}, \tag{1}$$

где ε – среднеквадратическое отклонение времени реверберации, T – измеренное время реверберации, N – число измерений времени реверберации, f – среднегеометрическая частота третьоктавной полосы.

Обратим внимание, что в (1) не входит фактическая дисперсия измеренных значений. На рис. 2 приведен расчет неопределенности по (1) для различных значений сила измерений N и двух значений времени реверберации T. Относительная неопределенность ε/T уменьшается с увеличением времени реверберации, при этом ее абсолютное значение ε увеличивается. Увеличение количества измерений не оказывает значимого влияния на неопределенность, поэтому значение $N = 12$, применимое при стандартных измерениях является достаточным.

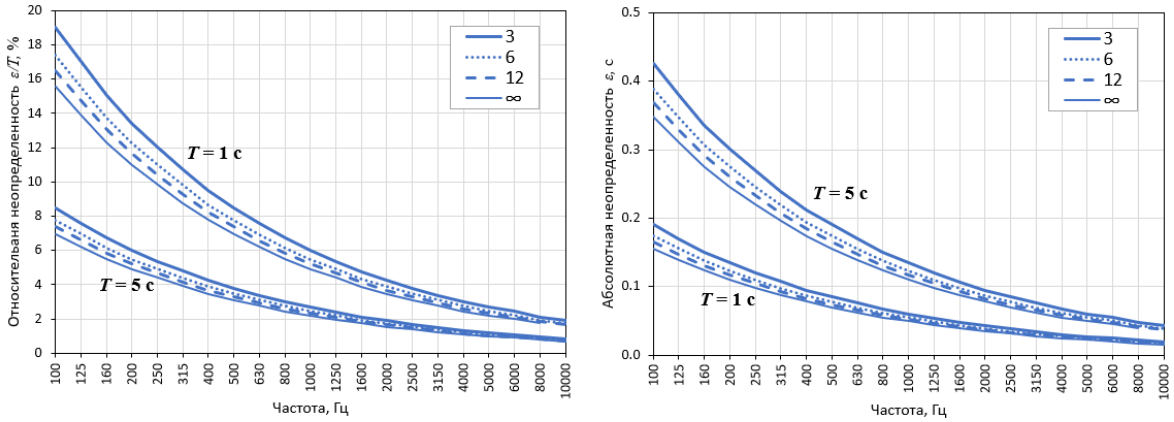


Рис. 2. Неопределенность согласно [3] для различного количества измерений N

Другой метрикой неопределенности измерений служит среднеквадратическое значение, определённое по результатам измерений [4]. Сравнение двух подходов к оценке неопределенности представлено на рис. 3 для измерений в пустой камере и в камере с испытуемым образцом по данным, приведенным на рис. 1.

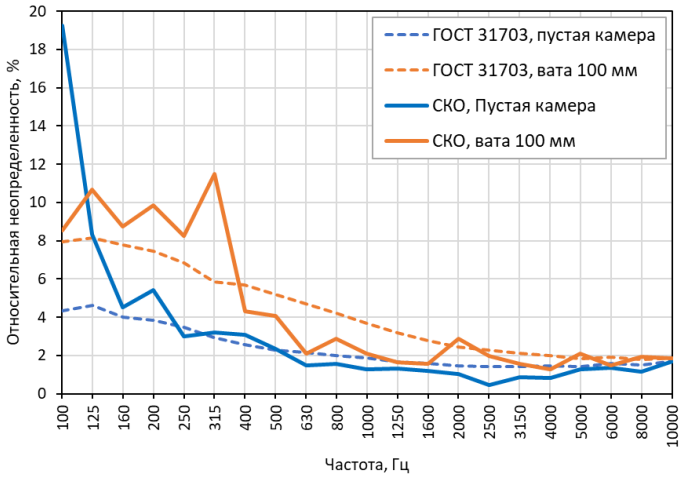


Рис. 3. Сравнение неопределенности, оцененной по методике ГОСТ 31703 [3] и среднеквадратическому отклонению для измерений, приведенных на рис. 1

Коэффициент звукопоглощения вычисляется по времени реверберации T_1 в пустой камере и T_2 в камере с образцом

$$\alpha = 55.3\frac{V}{Sc}\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right), \tag{2}$$

где V – объем камеры, S – площадь образца, c – скорость звука.

Пусть значения T_1 и T_2 измерены с неопределенностью δT_1 и δT_2 соответственно, тогда неопределенность измеренного коэффициента звукопоглощения равна

$$\delta\alpha^2 = \left(\frac{\partial\alpha}{\partial T_1}\delta T_1\right)^2 + \left(\frac{\partial\alpha}{\partial T_2}\delta T_2\right)^2. \tag{3}$$

Из (2) и (3) находим относительную неопределенность измерения коэффициента звукопоглощения

$$\frac{\delta\alpha}{\alpha} = \frac{\sqrt{\frac{1}{T_1^2}\left(\frac{\delta T_1}{T_1}\right)^2 + \frac{1}{T_2^2}\left(\frac{\delta T_2}{T_2}\right)^2}}{\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}}. \tag{4}$$

Если реверберация в пустой камере значительно выше, чем в камере с образцом, т.е. $T_1 \gg T_2$, как в примере, на рис. 1, то (4) значительно упрощается

$$\frac{\delta\alpha}{\alpha} \approx \frac{\delta T_2}{T_2}. \tag{5}$$

Неопределенность коэффициента звукопоглощения полностью определяется неопределенностью времени реверберации камеры с образцом, поэтому точность измерения времени реверберации в пустой камере не является существенной. Согласно (5) относительная неопределенность измерения коэффициента звукопоглощения, оцененная двумя способами, представлена на рис. 3 оранжевыми кривыми. Два метода оценки неопределенности дают качественно сопоставимые, но количественно значительно отличающиеся результаты.

3 Неопределенность расчета времени реверберации

Существует множество аналитических методик расчета времени реверберации, а также методы численного моделирования. Для каждого метода требуется отдельный анализ влияние неопределенности исходных данных. В качестве примера рассмотрим формулу Эйринга для времени реверберации

$$T = -0.16\frac{V}{S_0 \ln(1-\alpha)}, \tag{6}$$

где V – объем помещения, S_0 – площадь ограждающих поверхностей, α – средний по поверхности коэффициент звукопоглощения. Будем считать, что поглощение равномерно распределено на стенках помещений. Пусть значение α известно с неопределенностью $\delta\alpha$, тогда из (6) найдем неопределенность расчетного значения времени реверберации

$$\frac{\delta T}{T} = \left[\frac{\alpha}{(1-\alpha)\ln(1-\alpha)}\right]\frac{\delta\alpha}{\alpha}. \tag{7}$$

На рис. 4 приведена зависимость относительной неопределенности времени реверберации от относительной неопределенности коэффициента звукопоглощения для функции в квадратных скобках в (7), которую обозначим $N(\alpha)$.

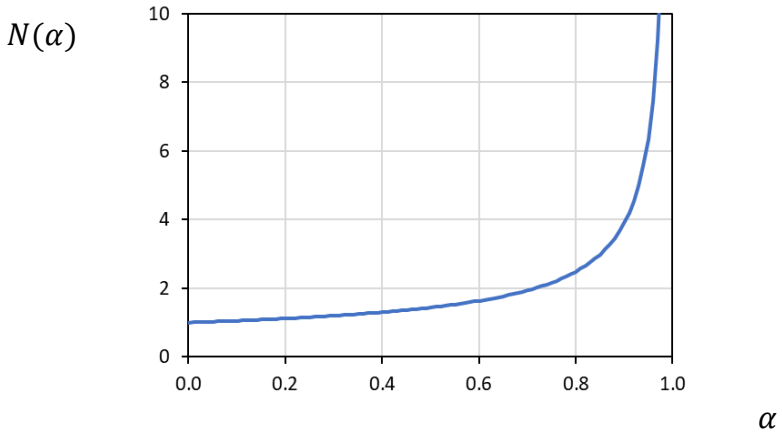


Рис. 4. Неопределенность расчета времени реверберации при различных коэффициентах звукопоглощения

Из рис. 4 следует, что относительная неопределенность расчета времени реверберации всегда больше неопределенности коэффициента звукопоглощения, и это отличие растет с ростом коэффициента звукопоглощения.

Заключение

Приведенные в работе оценки показывают, что при достаточно точном задании исходных данных в виде коэффициентов звукопоглощения, ожидаемая точность расчета времени реверберации по формуле Сэбина составляет около 10%. Но не всегда известны лабораторные данные по акустическим свойствам отделочных материалов. В этом случаем можно ожидать увеличения неопределенности прогноза. Отдельная задача состоит в определении качественного сходства расчетных и фактических значений времени реверберации с учетом неопределенности прогноза и неопределенности натурных измерений [5,6].

Список литературы

1. *Лившиц А.Я., Фадеев А.С., Шигрина Н.В.* Оценка влияния способа закрепления декоративно-отделочных панелей на фонд низкочастотного звукопоглощения в концертном зале // Труды XXXV сессии РАО, Москва. 2023. С.211-220.
2. *Polack J.-D.* Revisiting reverberation // Acta Acustica. 2025. **9**. 30.
3. ГОСТ 31704-2011. Материалы звукопоглощающие. Метод измерения звукопоглощения в реверберационной камере.
4. ГОСТ 34100.3-2017/ISO/IEC Guide 98-3:2008 Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения.
5. *D'Orazio D., Loreti L., De Cesaris S., Garai M.* Acoustic Measurement of Bonci Theatre in 2012 //Proc. AIA-DAGA, Merano. 2013. P.865-868.
6. *Новоселова А.И., Канев Н.Г.* Оценка неопределенности измерения времени реверберации в Большом зале Московской Консерватории // Труды VI конференции «Акустика среды обитания», Москва. 2021. С.214-221.

УДК: 534.62. DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39605

О ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТА ЗВУКОПОГЛОЩЕНИЯ В РЕВЕРБЕРАЦИОННОЙ КАМЕРЕ

Адамович М.Б.[1,2,a], **Канев Н.Г.**[1,2,3,b]

[1)] *Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, 127238, г. Москва, Локомотивный проезд, 21*
[2)] *Московский государственный технический университет,105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5*
[3)] *Московский государственный строительный университет,129337 Москва, Ярославское шоссе, 26*
E-mail: [a]m1602b@yandex.ru,[b]nikolay.kanev@mail.ru

Коэффициент звукопоглощения (КЗП) является ключевой характеристикой отделочных материалов помещений, необходимый для расчёта времени реверберации и других акустических параметров. Точность расчёта задается неопределённостью исходных данных, при этом геометрические размеры помещения могут быть определены с высокой точностью, в то время как акустические характеристики поверхностей могут иметь достаточно большую неопределенность. Данные по коэффициенту звукопоглощения определяются в лабораторных условиях, а именно: путём измерения времени реверберации в гулком помещении с образцом материала и без него. Цель настоящей работы состоит во выявлении неточности в измерениях реверберационного КЗП. В качестве метрики неопределенности измерений применено среднеквадратичное отклонение КЗП. Для достижения поставленной цели проанализирован массив данных, полученных в ходе научной деятельности, проводимой в НИИСФ РААСН, и применены методы статического анализа и обработки эксперимента. Проведённый анализ позволил получить количественную оценку неопределенность измерения для нескольких видов материалов с различными акустическими свойствами. Предложено применять неопределенность измерения коэффициента звукопоглощения в качестве акустической характеристики исследуемых материалов наряду с самим коэффициентом звукопоглощенияи использовать при акустических расчётах.

Ключевые слова: неопределенность, коэффициент звукопоглощения, среднее квадратичное отклонение, реверберационная камера, точность измерений.

ON THE ACCURACY OF MEASUREMENTS OF THE SOUND ABSORPTION COEFFICIENT IN A REVERBERATION CHAMBER

Adamovich M.B.[1,2,a], **Kanev N.G.**[1,2,3,b]

[1)]*Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences, 127238, Moscow, Lokomotivny proezd, 21*
[2)] *Moscow State Technical University, 1050055, Moscow, 2nd Baumanskaya Street*
[3)] *Moscow State University of Civil Engineering, 129337, Moscow, 26 Yaroslavskoe Shosse*
E-mail: [a]m1602b@yandex.ru,[b]nikolay.kanev@mail.ru

The sound absorption coefficient (SAC) is a key characteristic of interior finishing materials, necessary for calculating reverberation time and other acoustic parameters. Calculation accuracy is determined by the uncertainty of the initial data. While the geometric dimensions of a room can be determined with high accuracy, the acoustic characteristics of surfaces can have a significantly higher uncertainty. SAC data are determined in laboratory conditions, namely, by measuring the

reverberation time in a resonant room with and without a material sample. The purpose of this study is to identify inaccuracies in reverberation SAC measurements. The standard deviation of the SAC is used as a metric for measurement uncertainty. To achieve this goal, a data set obtained during scientific research at the Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences was analyzed, using methods of static analysis and experimental processing. The analysis allowed us to obtain a quantitative estimate of the measurement uncertainty for several types of materials with different acoustic properties. It is proposed to apply the uncertainty of SAC measurement as an acoustic characteristic of the materials under study along with the sound absorption coefficient itself and to use it in acoustic calculations.
Keywords: uncertainty, sound absorption coefficient, standard deviation, reverberation chamber, measurement accuracy.

Введение

Коэффициент звукопоглощения материалов и конструкций измеряется в реверберационной камере по стандартизованной методике [1].

Определяют среднее время реверберации в реверберационной камере с образцом и без него. Для этого источник шума располагают в разных точках, находящихся на расстоянии не менее 3 м друг от друга. Различное расположение микрофонов, применяемых для измерений, выбирают таким образом, что бы обеспечивалось расстояние между ними не меньше 1.5 м, 2 м — от любого источника шума и 1 м — от любой поверхности камеры и образца.

По результатам измерений времени реверберации вычисляют эквивалентную площадь звукопоглощения образца по формуле Сабина. Для образца равномерно распределенного по поверхности камеры, КЗП определяют как отношение значения эквивалентной площади звукопоглощения к рассматриваемой площади образца.

Стандарт [2] предлагает оценку неопределенности измерений, которая не зависит от фактической дисперсии измеренных значений. Отметим, что в российской практике в протоколах и отчетах по измерениям данные по неопределенности, как правило, не приводятся. В звукомерной камере НИИСФ РААСН регулярно проводятся испытания акустических материалов. В настоящей работе приводится анализ неопределенности измерений КЗП материалов и рассматривается возможность использования параметров неопределенности в представлении окончательных результатов измерений для полной оценки значений, измеряемых величин.

Неопределенность измерений

Реверберационная камера НИИСФ объёмом 188 м^3 и площадью ограждающих поверхностей 203 м^2, имеет трапецеидальную форму с длиной наибольшей диагонали I*m*ax = 13 м.

По результатам измерений времени реверберации вычисляют эквивалентную площадь звукопоглощения образца A_T по формуле Сэбина (1):

$$A_T = A_2 - A_1 = 55.3 \cdot V(\frac{1}{c_2 \cdot T_2} - \frac{1}{c_1 \cdot T_1}) - 4 \cdot V(m_2 - m_1) \quad (1)$$

где A_1, A_2— эквивалентные площади звукопоглощения, реверберационной камеры без образца и с образцом, м^2; V— объем реверберационной камеры, м^3; c_1, c_2—скорости распространения звука в воздухе при температуре в камере без образца и с образцом, м/с; T_1, T_2—время реверберации в камере без образца и с образцом; m_1 , m_2 — постоянные затухания звуковой энергии во время измерения в камере без образца и с образцом, м $^{-1}$.

Для образца равномерно распределенного по поверхности камеры, выходную величину КЗП α_S определяют как отношение значения эквивалентной площади звукопоглощения A_T к рассматриваемой площади образца S, которые представляют из себя входные величины.

$$\alpha_S = \frac{A_T}{S} \quad (2)$$

где S — площадь камеры, закрываемая образцом, м^2.

Выходную оценку измеряемой величины, обозначаемую y, получают как среднее арифметическое значение независимых их определений из n наблюдений по формуле [2]:

$$y = \overline{\alpha_S} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^{n} \alpha_{Sk} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^{n} (T_k, c_k, m_k, V) \quad (3)$$

где α_{Sk}— разброс значений в наблюдениях, обусловленный случайными изменениями влияющих величин. В работе [3] автор представляет конечный результат КЗП с учетом среднего арифметического значения.

Выборочную дисперсию, являющуюся оценкой дисперсии для данного распределения вероятностей величины, получают по формуле:

$$s^2(\alpha_{Sk}) = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{j=1}^{n} (\alpha_{Sj} - \overline{\alpha_S})^2 \quad (4)$$

Выборочная дисперсия среднего значения $s^2(\overline{\alpha_S})$, рассчитанная по формуле (5), определяет количественно, насколько хорошей оценкой математического ожидания величины α_S является $\overline{\alpha_S}$, и могут быть использованы в качестве меры неопределенности.

$$s^2(\overline{\alpha_S}) = \frac{s^2(\alpha_{Sk})}{n} \quad (5)$$

Выборочное стандартное отклонение n измерений одной и той же измеряемой величины, характеризующая разброс результатов измерений и определяемая квадратный корень из дисперсии.

$$s(\alpha_{Sk}) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{j=1}^{n} (\alpha_{Sj} - \overline{\alpha_S})^2} \quad (6)$$

Описания исследуемых образцов

Собранные и обработанные данные в течение представляют научный интерес с точки зрения статистики. Так, представляется возможность оценить точность полученных результатов (табл. 1) в одной и той же камере КЗП. При этом меняется температура и конструкции (рис. 1):

Таблица 1

Характеристики исследуемых образцов

Образец	Площадь, м^2	Материал панели
Образец №1	10.8	минеральная вата 15 мм, покрытие с двух сторон стелохолстом
Образец №2		минеральная вата 20 мм, покрытие с двух сторон стелохолстом
Образец №3		минеральная вата 25 мм, покрытие с двух сторон стелохолстом
Образец №4		минеральная вата 40 мм, покрытие с двух сторон стелохолстом
Образец №5	12.1	Перфорация, с заполнением минераловатными плитами вплотную к тыльной стороне панели, обтянутые акустической тканью
Образец №6		Гипсовыестроительные плиты в 2 слоя, обтянутые тканевым полотном с микроперфорацией вплотную
Образец №7		Гипсовые строительные плиты, обтянутые тканевым полотном с микроперфорацией
Образец №8		Гипсовые строительные плиты, обтянутые тканевым полотном с микроперфорацийс воздушным отступом
Образец №9		Гипсовые строительные плиты
Образец №10	13.3	деревянный каркас с воздушным относом, с заполнением пористо-волокнистыми плитами толщиной 50 мм
Образец №11		деревянный каркас с воздушным относом, с заполнением пористо-волокнистыми плитами толщиной 10 мм

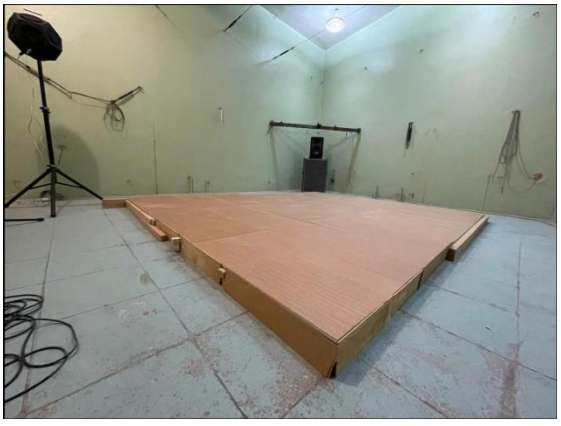


Рис. 1. Вид исследуемого 11-ого образца в реверберационной камере НИИСФ РААСН

Результаты

На рис. 2 приведены результаты лабораторных измерений коэффициента звукопоглощения для 11 образцов, на графиках приведены средние значения (3) по 12 измерения по двенадцати измерениям. Образны можно условно разделить на две группы: с низким (образцы 6, 7, 8, 9) и высоким (все остальные образцы) поглощением.

Разброс измеренных значений, характеризуемый стандартным отклонением (6) и определенный по 12 измерения, приведен на рис. 3 для каждого образца. Наибольшая неопределенность имеет место на низких частотах и с ростом частоты уменьшается. В частотном диапазоне 1000-4000 Гц она имеет минимальное значение и не превышает 0.05 для всех образцов. На частотах выше 4000 Гц неопределённость становится выше. Наибольшее значение стандартного отклонения имеют образцы 2 с высоким поглощением и 6, 7 с низким поглощением. Наименьшую неопределенность показал образец 8 – слабопоглощающий материал. В целом не наблюдается взаимосвязи абсолютной неопределенности со значением коэффициента звукопоглощения.

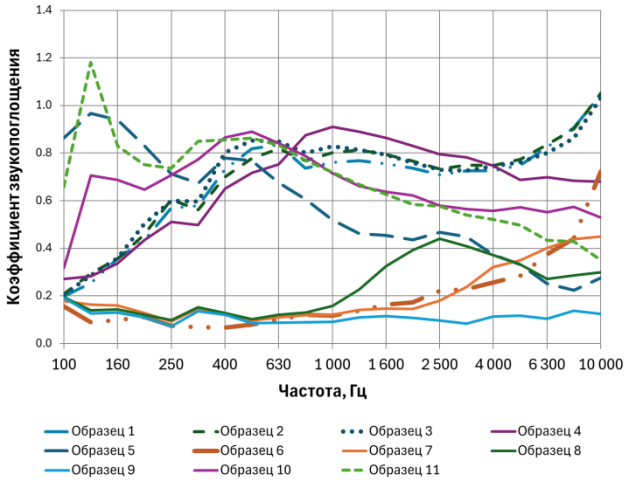


Рис. 2. Измеренный коэффициент звукопоглощения для 11 образцов

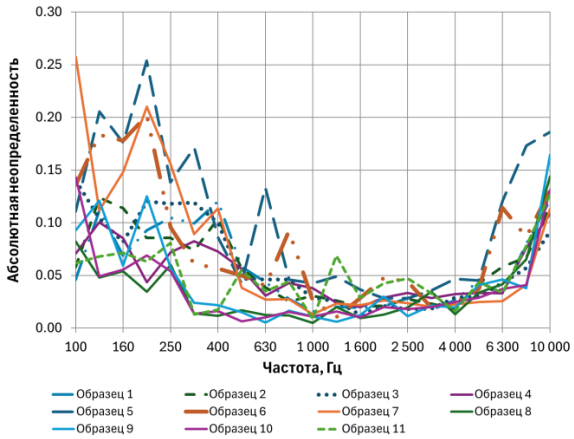


Рис. 3. Абсолютная неопределенность коэффициента звукопоглощения для 11 образцов

Оценим относительную неопределенность в виде отношения стандартного отклонения к среднему значению коэффициента звукопоглощения $f = s(\alpha_{sk}) / \alpha_s$, выраженному в процентах. На рис. 4 приведены частотные зависимости относительной неопределенность для всех образцов. Наибольшие значения имеют место для образца 9 с самым низким коэффициентом звукопоглощения. Другие образцы с низким поглощение (6, 7, 8) также имеют

наибольшую относительную неопределенность на низких частотах. На средних частотах все образцы, за исключением 9, имеют неопределенность около 10%.

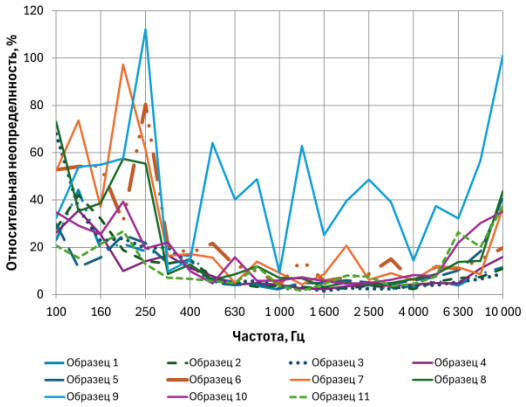


Рис. 4. Относительная неопределенность коэффициента звукопоглощения для 11 образцов

Заключение

Приведена оценка неопределенности измерения коэффициентов звукопоглощения в реверберационной камере по стандартной методике [1] для 11 образцов с разным коэффициентом звукопоглощения. На низких частотах наблюдается наибольшая неопределенность, которая уменьшается с ростом частоты. Абсолютная неопределенность, выраженная в виде стандартного отклонения, не связана с коэффициентом звукопоглощения и имеет значения 0,05-0,25 на низких частотах и 0,02-0,1 на средних частотах. Относительная неопределенность на средних частотах не превышает 20% для десяти образцов.

Таким образом, неопределенность измерений сильно зависит от образца, особенно на низких частотах. Поэтому подход для оценки неопределенности, предлагаемый [1], представляется нецелесообразным, поскольку не учитывается фактический разброс измеренных значений коэффициента звукопоглощения. Необходима актуализация методики [1] в части оценки неопределенности измерений.

Список литературы

1. ГОСТ 31704-2011Материалы звукопоглощающие. Метод измерения звукопоглощения в реверберационной камере.
2. ГОСТ 34100.3-2017Неопределённость измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределённости измерения.
3. *Мурзинов П.В*. Способ определения среднего значения коэффициента звукопоглощения // Безопасность труда в промышленности. 2010. №12. С. 42–46

УДК: 534.843 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39606

НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ ОЦЕНКИ ВРЕМЕНИ РЕВЕРБЕРАЦИИ В ПОМЕЩЕНИЯХ ПРИ АКУСТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ

Алешкин В.М.[1,2], Числов Д.С.[2,5], Канев Н.Г. [1,3], Субботкин А.О.[2,4]

[1)] Научно-исследовательский институт строительной физики (НИИСФ РААСН), г. Москва;

[2)] ООО «АС-Акустик», г. Москва;

[3)]НИУ МГСУ, Москва

[4)]Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук г. Москва;

[5)]Московский технический университет связи и информатики (МТУСИ), г. Москва

Тел.: +7(916) 852 79 22; E-mail: wsjk@mail.ru

В работе анализируется зависимость величины расчетной оценки времени реверберации в помещениях от неопределенности задания коэффициентов звукопоглощения. Получены зависимости для расчета по статистической теории (формуле Эйринга) и при применении компьютерного моделирования (в ПО AFMG EASE) в модельных помещениях упрощенной формы. Рассмотрены случаи равномерного и неравномерного распределения звукопоглощения по поверхностям помещения. Приводится оценка погрешности расчетов с использованием численного моделирования в зависимости от количества лучей (повторяемость расчетов в модели). Оценена неопределенность времени реверберации в моделях для моделей реальных залов при заданном разбросе коэффициентов звукопоглощения (КЗП) некоторых поверхностей.

Ключевые слова: архитектурная акустика, акустическое моделирование, время реверберации, коэффициент звукопоглощения

UNCERTAINTY IN ESTIMATING REVERBERATION TIME IN ROOMS USING ACOUSTIC MODELING

V.M. Aleshkin[1,2], D.S. Chislov[2,5], N.G. Kanev[1,3], A.O. Subbotkin[2,4]

[1] Research Institute of Building Physics (NIISF RAASN), Moscow

[2] AS-Acoustic LLC, Moscow

[3] Moscow State University of Civil Engineering (MGSU), Moscow

[4] Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow

[5] Moscow Technical University of Communications and Informatics (MTUCI),

E-mail: wsjk@mail.ru

The paper analyzes how the estimated reverberation time in rooms depends on the uncertainty in the assigned sound absorption coefficients. Relationships are obtained both for calculations based on statistical theory (the Eyring formula) and for computer modeling (using AFMG EASE software) in simplified model rooms. Cases of uniform and non-uniform distribution of sound absorption over the room surfaces are considered. An estimate is given of the calculation error associated with numerical modeling as a function of the number of rays used, that

is, the repeatability of model calculations. The uncertainty of reverberation time is also assessed for models of real halls with a specified variation in the sound absorption coefficients of some surfaces.

Keywords: architectural acoustics, acoustic modeling, reverberation time, sound absorption coefficient

Введение

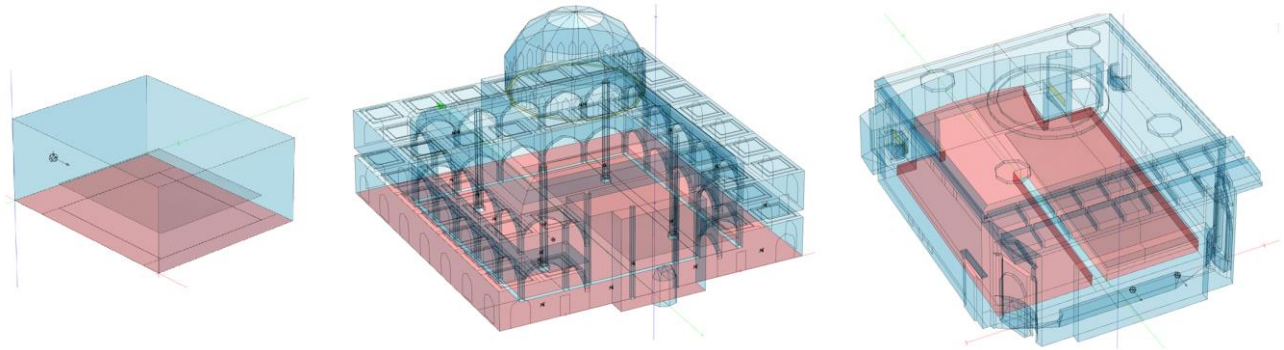
В отечественных и зарубежных нормативных и рекомендательных документах целевые значения времени реверберации в помещениях приводятся с определенными допусками, которые должны быть соблюдены в рамках акустического проектирования. Обычно для диапазона средних частот отклонения от объемных оптимумов составляют ±10% (напр., СП [1]). При этом на практике почти не оценивается погрешность применяемых расчетных методов, применяемых для определения времени реверберации: как статистических методов (расчеты по формулам Эйринга и Сэбина), так и с применением математического моделирования на основе лучевых методов (ПО EASE, ODEON и аналогичные). В то же время одним из ключевых факторов, влияющих на точность оценки времени реверберации, является корректное задание коэффициентов звукопоглощения (далее – КЗП) в частотных полосах для поверхностей помещения. Для специальных акустических материалов имеет место неопределенность измерений КЗП при испытаниях в реверберационной камере, а также разброс значений КЗП для одного и того же типа материала в зависимости от разных партий и производителей. Для общестроительных материалов в различных источниках приводятся разнообразные справочные данные, которые для некоторых материалов и конструкций различаются достаточно существенно (напр., [2,3]). Также высокая неопределенность КЗП имеет место для зрительских мест и публики в креслах, на полу и для прочих объемных поглотителей, данные по которым в базе данных ПО для акустических расчетов, в протоколах испытаний и в различных справочных источниках также могут сильно розниться [4,5].

В связи с этим представляется важным определить величину неопределенности конечного рассчитываемого параметра (времени реверберации) и ее чувствительность по отношению к вариативности задания КЗП. Кроме того, при этом важно оценить базовую неопределенность при расчетах методом компьютерного моделирования (основанного на методе прослеживания лучей) и иметь возможность сопоставить погрешность расчетов при использовании данного метода.

Краткий план исследования

Как расчеты по статистической теории, так и моделирование с применением лучевой теории в современной практике проводятся с помощью специализированного ПО. Результаты настоящего исследования получены по итогам расчетов на моделях помещений в ПО AFMG EASE с расчетным модулем AURA, являющимся на сегодняшний день одним из наиболее распространенных программных комплексов для проведения расчетов в области архитектурной акустики и электроакустики.

В рамках исследования были рассмотрены 4 модели помещений: 1) прямоугольный параллелепипед с равномерным распределением КЗП α по поверхностям; 2) прямоугольный параллелепипед с неравномерным распределением КЗП (стены и потолок – со слабым поглощением, пол – с выраженным поглощением); 3) молельный зал крупной мечети (стены и потолок – со слабым поглощением, пол - ковер с сидящими людьми); 4) зал дома культуры на 400 мест (стены и потолок – со слабым поглощением, на полу размещены мягкие кресла). Вид моделей показан на рис.1, параметры моделей более подробно приведены на рис.2-4.



а) *б)* *в)*

Рис.1. Вид моделей помещений, принятых к анализу: *а* – прямоугольное помещение с однородным КЗП / со звукопоглощающим полом; *б* – молельный зал мечети; *в* – зал дома культуры на 400 человек

По результатам практического опыта расчетов с применением акустического моделирования, было решено проанализировать влияние следующих факторов, которые могут иметь влияние на величину неопределенности времени реверберации и приводить к погрешности его оценки:

1. Количество лучей, задаваемых при моделировании. При уменьшении количества лучей вероятность прохода отраженного луча через расчетные точки уменьшается, в результате чего могут быть потеряны сведения об отражениях первых порядков, вносящих существенный вклад в картину отклика помещения. В рамках работы для каждой из моделей был проведен расчет с количеством лучей, соответствующим 3 степеням оценки точности моделирования в ПО EASE, в зависимости от количества лучей: intermediate («среднее»), high («высокое»), very high («очень высокое»). Данная

величина определяется программой автоматически, исходя из параметров модели (см. таблицу 1). В каждой из моделей было произведено по 3 итерации расчета для каждого варианта и оценена повторяемость результатов.

2. Неопределенность задания КЗП для одной или нескольких поверхностей в помещении. В первой модели задан однородный КЗП на всех поверхностях, в остальных трех моделях заданы 2 КЗП (более выраженное поглощение на полу и слабое поглошение на стенах и потолке). Для каждого КЗП задавалось отклонение (+3%, +10%, +20%, +30%) и оценивалось снижение времени реверберации при расчете по формуле Эйринга и при моделировании методом прослеживании лучей. Рассмотрены случаи изменения каждого КЗП по отдельности и одновременно. Для удобства анализа зависимости рассмотрены для диапазонов низких, средних и высоких частот, соответствующие усреднению времени реверберации по октавным полосам 125-250 Гц (НЧ), 500-1000 Гц (СЧ) и 2000-4000 Гц (ВЧ).
3. Разброс значений времени реверберации по расчетной зоне при моделировании. При моделировании в EASE (как и в прочем подобном ПО) точки расчета задаются с определенным шагом, а результирующее время реверберации как глобальный параметр рассчитывается усреднением по всем точкам. В случае неравномерного распределения звукопоглощающей отделки, а также сложной формы помещения, может обеспечиваться достаточно сильный разброс значений времени реверберации. Для ряда моделей была рассчитана величина относительного стандартного отклонения при моделировании.

В настоящей работе более подробно будет рассмотрена неопределенность оценки времени реверберации, связанная с вариативностью задания КЗП. Остальные два фактора будут рассмотрены в кратком виде.

Результаты расчетов и анализ полученных данных

1. При задании разного количества лучей для времени реверберации оценивалось относительное стандартное отклонение (коэффициент вариации) c_v (в %), вычисляемое как отношение стандартного отклонения к среднему значению по выборке:

$$c_v = \frac{\sigma}{\bar{x}} \tag{1}$$

где σ – стандартное отклонение, $\bar{x}$ – среднее значение по выборке.

Из Таблицы 1 следует, что для рассматриваемых моделей величина отклонения составляет не более 0,7 – 2,0% для среднего количества лучей и составляет 0,1-0,4% для очень высокого количества лучей. Тем не менее, следует отметить, что в отдельных

полосах частот малое количество лучей может заметно влиять на значения времени реверберации. В помещениях с присоединенными объемами для малого или среднего количества лучей отклонения в некоторых полосах частот от среднего значения могут достигать 10%.

Таблица 1

Количество лучей при моделировании *N* и относительное стандартное отклонение c_v

Модель	**Среднее**		**Высокое**		**Очень высокое**	
	N	c_v, %	*N*	c_v, %	*N*	c_v, %
Параллелепипед* V = 320 м^3	23 тыс.	0,5 (2,0)	92 тыс.	0,3 (0,9)	367 тыс.	0,2 (0,4)
Дом культуры V = 2500 м^3	90 тыс.	0,7	361 тыс.	0,3	~1,45 млн	0,2
Мечеть V = 14 000 м^3	~1 млн	0,4	~4 млн	0,2	~16 млн	0,1

* в скобках показано значение c_v для варианта со звукопоглощающим полом

2. Зависимость изменения времени реверберации (снижение в %) от изменения КЗП (увеличение в %) показана на рис.2-5. Пунктирной синей линией показаны значения времени реверберации, рассчитанные по формуле Эйринга, сплошной красной линией – рассчитанные методом прослеживания лучей в модуле AURA в ПО EASE. Из рис.2 (прямоугольная модель, однородная отделка одинаковым КЗП во всех полосах частот) следует, что время реверберации, рассчитанное обоими методами, снижается в целом пропорционально изменению КЗП.

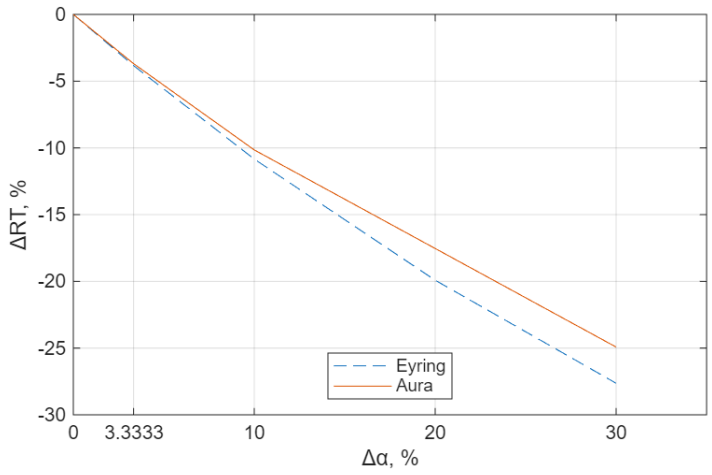
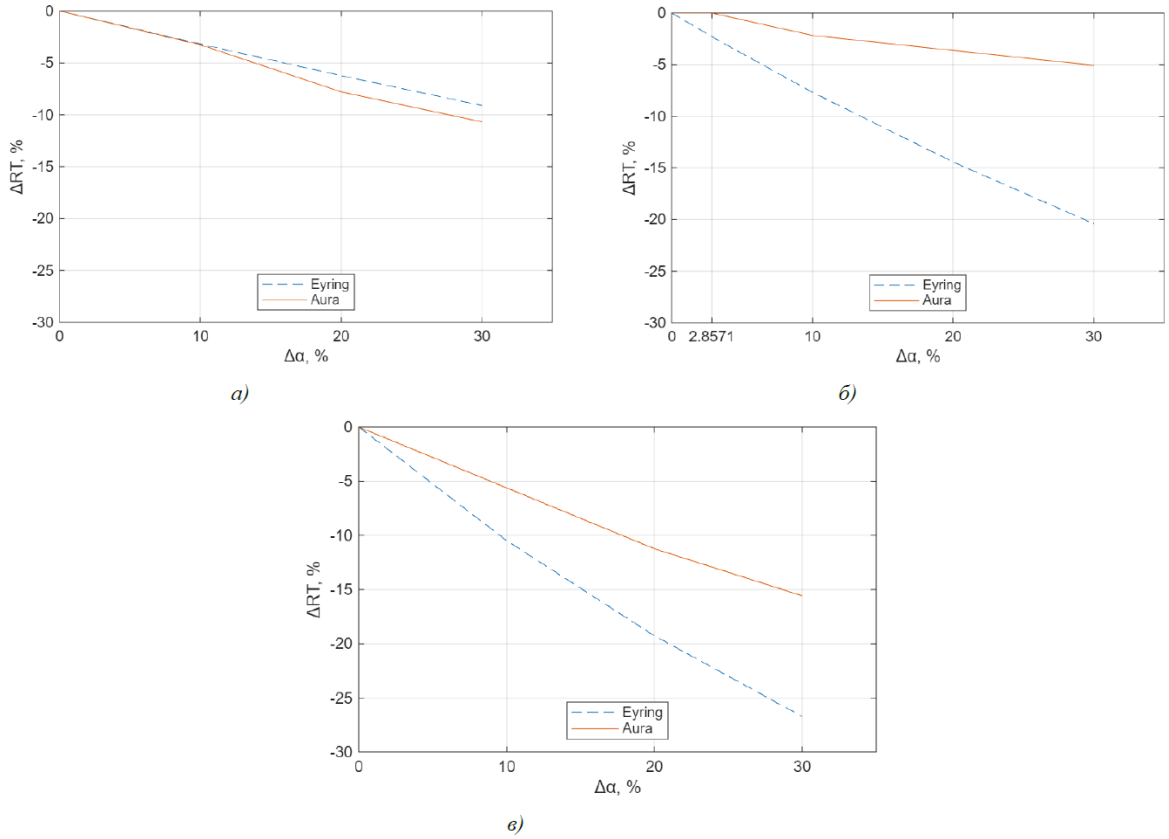


Рис.2. Прямоугольное помещение (КЗП всех поверхностей α_0 = 0.3), см. рис.1, *а*. Размеры 8 х 10 х 4 м. Воздушный объем V = 320 м^3. Зависимость изменения величины времени реверберации от изменения КЗП.

Из расчетов на той же модели, но с неравномерным распределением поглощения следует, что изменение КЗП стен и потолка (рис.3, *а*) приводит к слабому изменению реверберации (что связано с небольшим изменением фонда звукопоглощения по сравнению с влиянием поглощающего пола), при этом расчеты по статистической и

лучевой теории качественно согласуются между собой. Увеличение КЗП пола вплоть до 30% (рис. 3, *б*) не существенно влияет на снижение времени реверберации при моделировании, что связано с недиффузностью звукового поля и явлением т.н. «горизонтальной» реверберации, приводящей к заметному отклонению расчетов по статистической теории и методом прослеживания лучей. В на рис.3, *в* показан суммарный эффект одновременного изменения обоих КЗП (для последующих моделей данный режим не рассматривается, так как показывает качественно схожие результаты).



а) *б)*

в)

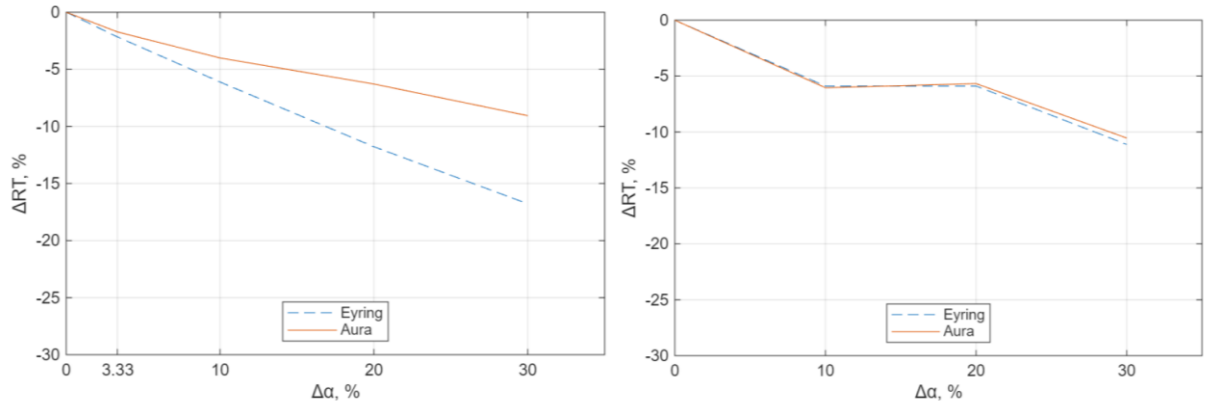
Рис.3. Прямоугольное помещение. КЗП стен и потолка α_1=0.1 (74% площади); КЗП пола α_2=0.7 (26% площади), см. рис.1, *а*. Размеры 8 х 10 х 4 м. Воздушный объем V = 320 м^3. Зависимость изменения величины времени реверберации от изменения КЗП в диапазоне средних частот (500-1000 Гц):

а – изменение КЗП стен и потолка (α_1=0.1: +10%, +20%, +30%); *б* – изменение КЗП пола (α2=0.7: +3%, +10%, +20%, +30%);

в - Изменение обоих КЗП (α_1=0.1, α_2=0.7: +10%, +20%, +30%).

На рис.4 и 5 приводятся аналогичные зависимости для модели молельного зала мечети и зрительного зала дома культуры. На некоторых графиках (см., напр., рис.4, *б*) можно заметить горизонтальный участок зависимости изменения RT от КЗП, что связано с округлением КЗП в ПО EASE до значений, кратных 0,01, в результате чего вносимые изменения (в %) не приводят к увеличению фонда звукопоглощения. Отсюда можно сделать вывод, что в некоторых случаях задание КЗП с точностью ±0,01 может приводить к неопределенности времени реверберации до 5%. В связи с неравномерным

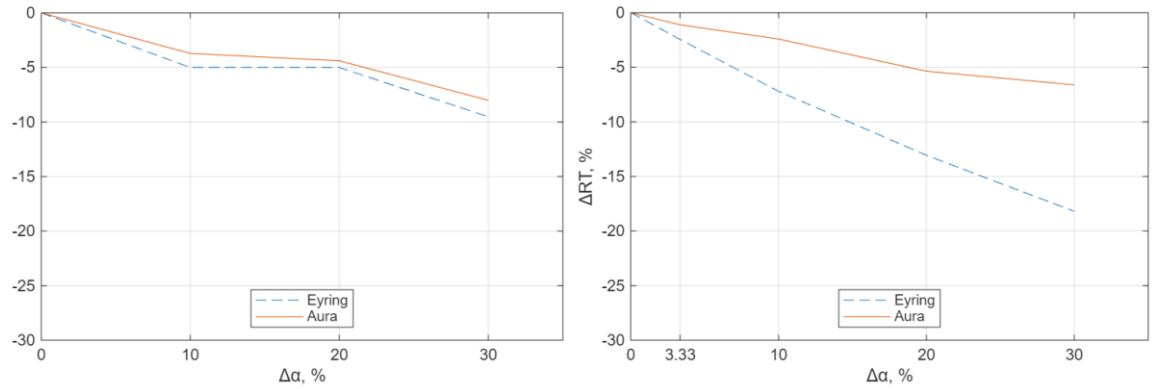
распределением отделки (преобладанием поглощения на полу как в модели мечети, так и в модели зала) аналогично упрощенной модели параллелепипеда наблюдается расхождение расчетов по статистической и лучевой методикам и слабое влияние изменения отделки пола (кресел) на снижение времени реверберации при моделировании.



а) *б)*

Рис.4. Молельный зал мечети. КЗП стен и потолка α_1 – штукатурка (82% площади), КЗП пола α_2 – ковер с сидящими людьми (18% площади), см. рис.1, *б*. Воздушный объем V = 14 000 м^3.

Зависимость изменения величины времени реверберации от изменения КЗП: *а* - изменение КЗП стен и потолка (α_1: +10%, +20%, +30%); *б* - изменение КЗП стен и потолка (α1: +10%, +20%, +30%).

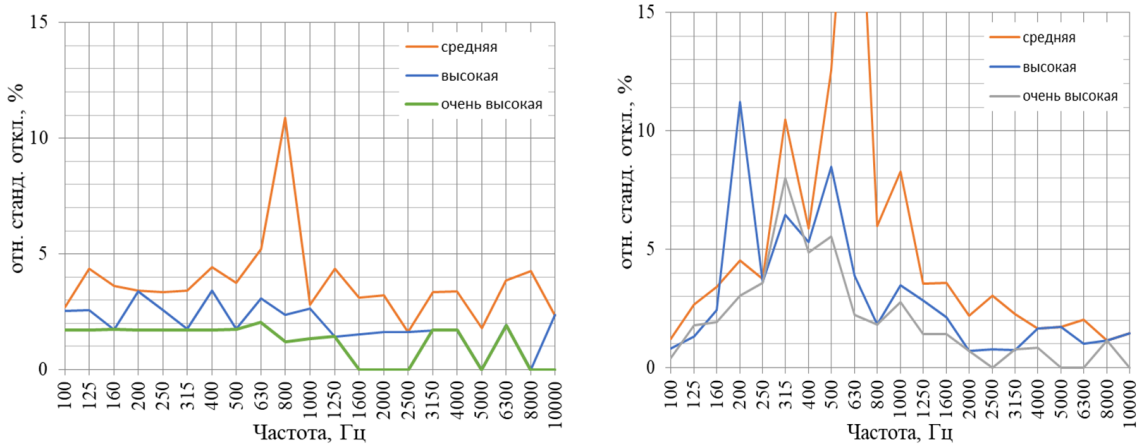


а) *б)*

Рис.5. Зрительный зал дома культуры на 400 человек. КЗП стен и потолка α_1 – штукатурка (83% площади), КЗП зоны зрительских мест α_2 – мягкие кресла (17% площади), см. рис.1, *в*. Воздушный объем V = 2500 м^3.

Зависимость изменения величины времени реверберации от изменения КЗП: *а* - изменение КЗП стен и потолка (α_1: +10%, +20%, +30%); *б* - изменение КЗП кресел (α_2: +3%, +10%, +20%, +30%).

Анализ разброса значений времени реверберации по расчетным точкам в рамках расчетной зоны при моделировании (рис.6) показал, что при неравномерном распределении отделки и усложнении геометрии помещения величина стандартного отклонения возрастает. При увеличении количества лучей неопределенность, связанная с данным фактором, уменьшается, но в среднем относительное стандартное отклонение может составлять порядка 5%, а в отдельных полосах превышает 25% (рис.6, *б*).



а) *б)*

Рис.6. Относительное стандартное отклонение (%) времени реверберации по результатам моделирования в EASE AURA при разном количестве лучей: *а* -прямоугольное помещение с поглощающим полом; *б* - зал на 400 человек

Заключение

В работе рассмотрены факторы, влияющие на неопределенность времени реверберации при расчете по статистической теории и методом прослеживания лучей на компьютерной модели. Показано, что условия моделирования (количество лучей) для рассмотренных моделей не приводят к существенной погрешности расчетов. Вариативность задания КЗП зависит от равномерности распределения звукопоглощения по поверхностям помещения. В случае недиффузных условий (поглощающий пол) и проявления «горизонтальной» реверберации изменение КЗП пола даже в достаточно широких пределах (до 30%) приводит к незначительному изменению времени реверберации, а расчеты по статистической и лучевой теории имеют существенное расхождение. Усреднение времени реверберации по ряду расчетных точек, распределенных по зоне расчета в модели, может приводить к заметной неопределенности, в особенности в помещениях с неравномерным распределением звукопоглощения и присоединенными объемами.

Список литературы

1. Свод правил СП 51.13330.2011. Защита от шума.
2. *Сапожков М.А.* и др. Акустика. Справочник. М: Радио и связь, 1989.
3. *Рудник В.М., Муравьева С.Г., Айзенберг Н.Б., Тумаркина Е.С.* Звукопоглощающие материалы и конструкции. Справочник. М: Связь, 1970.
4. Руководство по акустическому проектированию залов многоцелевого назначения средней вместимости. М.: Стройиздат. 1981.
5. *Beranek L.* Concert Halls and Opera Houses. Springer Verlag, New York, 2004.

УДК: 534.84 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39607

Оценка точности акустического моделирования учебных классов на примере школы «Самолетум»

Д.С. Числов[1,2,a], В.М. Алешкин[1,3,b], А.А. Стукало [1,c], А.О. Субботкин [1,4,d]

[1] ООО «АС-Акустик», г. Москва, ул. Нижегородская, д. 9В, помещ. 13
[2] Московский технический университет связи и информатики (МТУСИ), г. Москва, ул. Авиамоторная, д. 8А
[3] Научно-исследовательский институт строительной физики (НИИСФ РААСН), г. Москва, Локомотивный пр., д. 21
[4] Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук г. Москва, ул. 5-я Магистральная, д. 11
E-mail: [a]d.chislov@as-acoustic.ru, [b]v.aleshkin@as-acoustic.ru, [c]a.stukalo@as-acoustic.ru, [d]a.subbotkin@as-acoustic.ru

Аннотация: В настоящей работе представлен сравнительный анализ результатов расчетов акустических параметров учебного помещения и результатов натурных измерений. Объектом исследования является класс в школе «Самолетум» в г. Красногорске. По результатам сопоставления двух серий измерений и расчетов с применением компьютерного моделирования в ПО AFMG EASE делаются выводы о точности акустических расчетов в модели и возможных причинах расхождения результатов расчетов и измерений. Оценка производится для таких параметров как время реверберации и индекс передачи речи (STI).

Ключевые слова: архитектурно-строительная акустика, акустика учебных помещений, время реверберации, индекс передачи речи, акустическое моделирование, акустические измерения

Evaluation of the accuracy of acoustic modeling of classrooms using the example of the «Samoletum» school

D.S. Chislov[1,2,a], V.M. Aleshkin [1,3,b], A.A. Stukalo[1,c], A.O. Subbotkin[1,4,d]

[1] OOO «AS-Acoustic», Moscow, Nizhegorodskaya str., 9B, room. 13
[2] Moscow Technical University of Communications and Informatics (MTUCI), Moscow, Aviamotornaya str., 8A
[3] Scientific Research Institute of Building Physics (NIISF RAASN), Moscow, Lokomotivny ave., 21
[4] A.M. Prokhorov Institute of General Physics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 5th Magistralnaya str., 11
E-mail: [a]d.chislov@as-acoustic.ru, [b]v.aleshkin@as-acoustic.ru, [c]a.stukalo@as-acoustic.ru, [d]a.subbotkin@as-acoustic.ru

Abstract: This paper presents a comparative analysis of the results of calculations of the acoustic parameters of the classroom and the results of field measurements. The object of the study is a classroom at the «Samoletum» school in Krasnogorsk. Based on the results of comparing two series of measurements and calculations using computer modeling in the AFMG EASE software,

conclusions are drawn about the accuracy of acoustic calculations in the model and possible reasons for the discrepancy between the results of calculations and measurements. The evaluation is performed for parameters such as reverberation time and speech transmission index (STI).
Keywords: architectural and construction acoustics, acoustics of classrooms, reverberation time, speech transmission index, acoustic modeling, acoustic measurements

PACS:43.55.Dt

Введение

Проблема плохой акустики учебных помещений давно и хорошо известна в России и за рубежом [1-6].

Перед авторами данной работы была поставлена задача разработать акустическое оформление для классов и пространств школы «Самолетум», которые в изначальном состоянии не имели акустического оформления и характеризовались высокой гулкостью и удовлетворительной разборчивостью речи. Суть работы проиллюстрирована на примере одного из кабинетов.

Рассматриваемый кабинет имеет форму приближенную к прямоугольному параллелепипеду со сторонами 8.8:7:3.4 м (Д:Ш:В). Объем помещения составляет около 215 м^3. Общая площадь поверхностей составляет около 275 м^2. Заполняемость класса составляет 21 место. В кабинете присутствуют 3 окна, одно расположено по короткой стене, другие два окна расположены по длинной стене. Место учителя и учебная доска находятся вдоль одной из коротких стен, учебные парты расположены также вдоль коротких стен, образуя три характерных ряда парт. Вдоль стен располагаются несколько шкафов высотой 1.8 м.

Перед разработкой акустического оформления были проведены измерения времени реверберации RT_{60} и индекса передачи речи STI. На основе полученных данных была построена и акустически откалибрована трехмерная модель в ПО AFMG EASE (незначительное изменение коэффициентов звукопоглощения материалов в пределах ± 0.05). Вид акустической модели представлен на рис. 1. Результаты измерений времени реверберации до и после реализации акустического оформления представлены на рис. 2. На этом же рисунке представлены результаты расчетов времени реверберации для кабинета с акустическим оформлением. Для всех трех графиков приведены парные графики коррекции времени реверберации на заполнение помещения учениками. Индекс передачи речи представлен в табл. 1.

Как видно по графикам времени реверберации на рис. 2 и значениям STI в табл. 1 задача по разработке акустического оформления была решена.

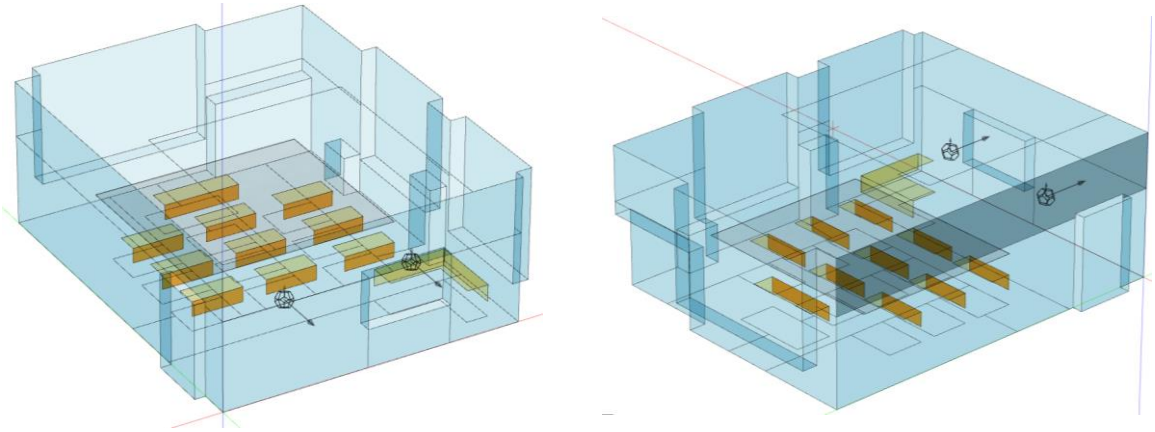


Рис. 1. Виды акустической модели помещения

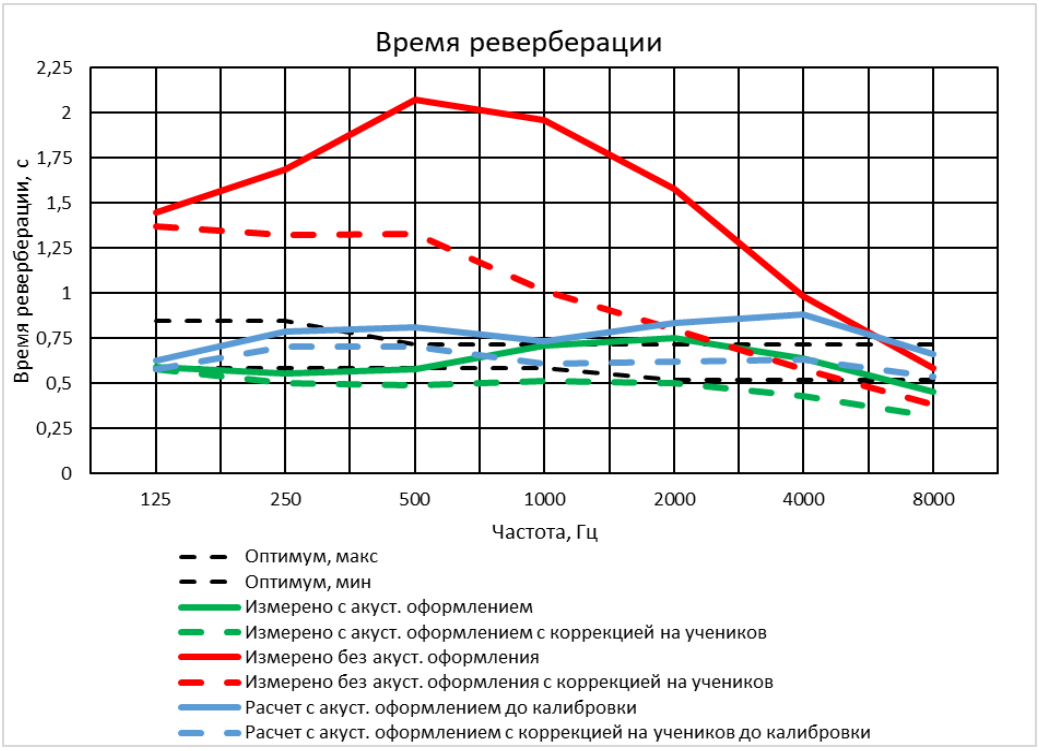


Рис. 2. Результаты измерений времени реверберации в сравнении с расчетными значениями

Таблица 1

Результаты измерений индекса передачи речи в сравнении с расчетными значениями

Режим расчета/измерений	STI	
	без учеников	с коррекцией на учеников
Измерено без акуст. оформления	0.53	-
Расчетные значения без акуст. оформления	0.50	0.59
Расчетные значения с акуст. оформлением	0.66	0.71
Измерено с акуст. оформлением	0.73	-
Расчетные значения с акуст. оформлением (повторно откалиброванная модель)	0.70	0.74

О точности полученных результатов моделирования

Стандартной практикой акустического проектирования является калибровка акустической модели после проведения предварительных измерений. Сначала был проведен акустический расчет, в котором использовались справочные значения КЗП общестроительных материалов (из стандартной библиотеки EASE). Далее была произведена тонкая калибровка значений КЗП (преимущественно в пределах нескольких сотых) для того, чтобы расчетные значения приблизились к измеренным.

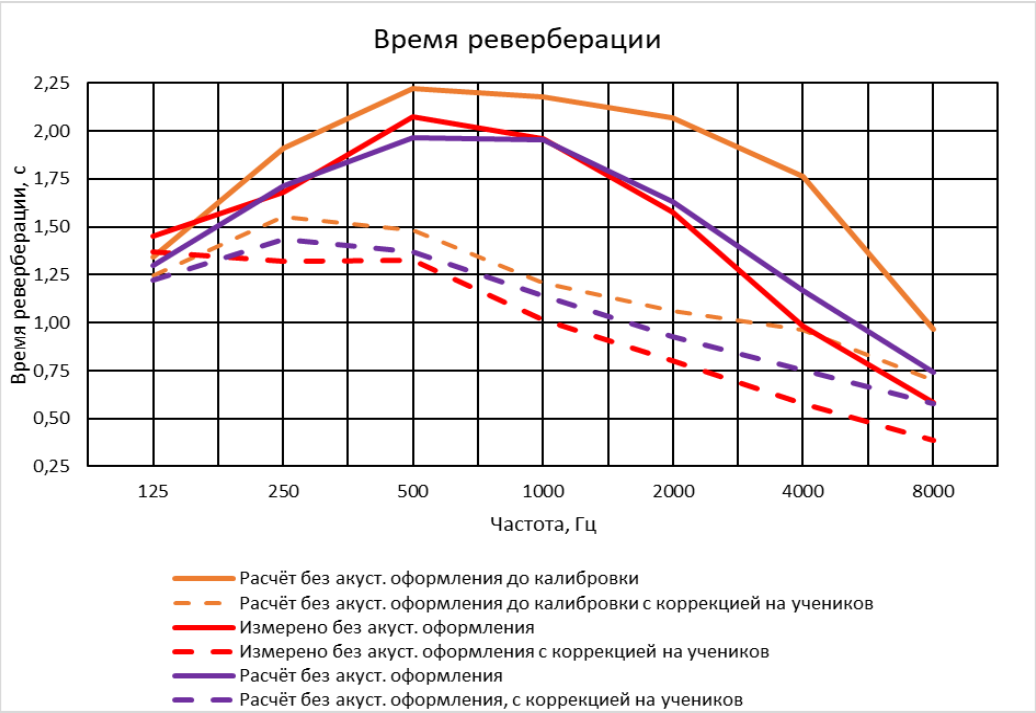


Рис. 3. Сопоставление результатов измерений времени реверберации с результатами моделирования для помещения без акустического оформления

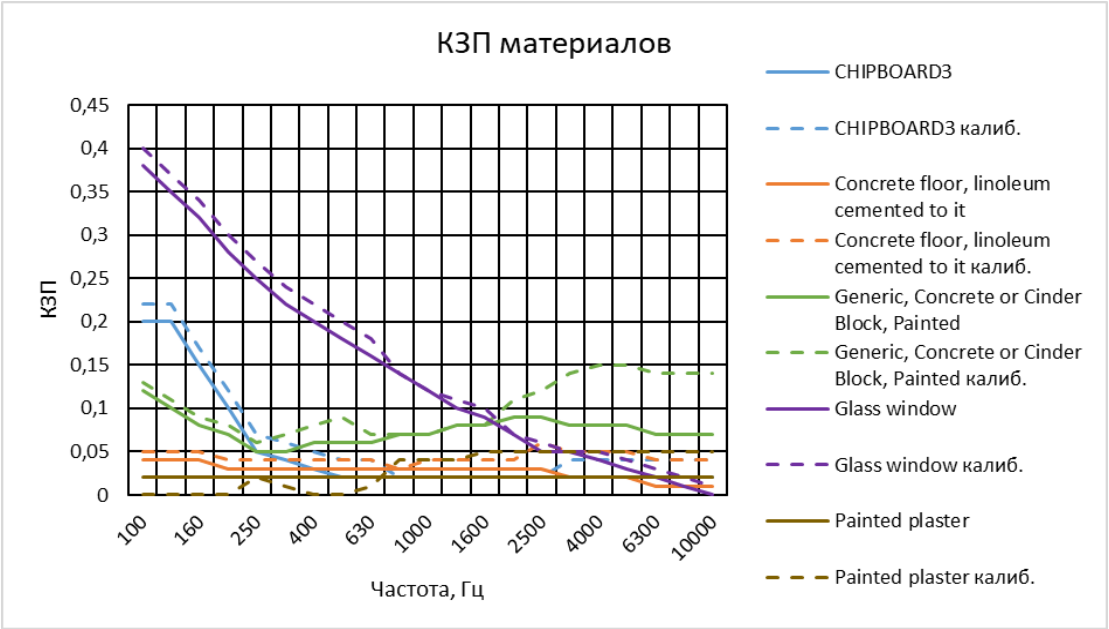


Рис. 4. Откалиброванные значения КЗП материалов в сравнении с стандартными для акустической модели помещения без акустического оформления

Сравнение результатов расчётов и измерений (рис. 3) показывают большую степень влияния на реверберацию даже таких малых изменений КЗП (рис. 4).

Учитывая изначальное ограничение в точном определении истинного КЗП общестроительного материала, расхождения между расчётами и измерениями показывают оценку инженерной точности в расчётном определении.

Перейдем к этапу расчета модели с акустическим оформлением. При реализации разработанного акустического решения (размещение звукопоглощающих материалов на потолке) в помещение появилось более сложное интерьерное решение, а также была перекрашена одна стена. Это было учтено при подготовки модели.

Однако, при сопоставлении результатов компьютерного моделирования времени реверберации с результатами измерений в помещении с уже реализованной акустической отделкой (см. рис. 5) видно, что относительное расхождение расчётов и измерений увеличилось в сравнении с ранее полученными результатами для помещения без акустического оформления.

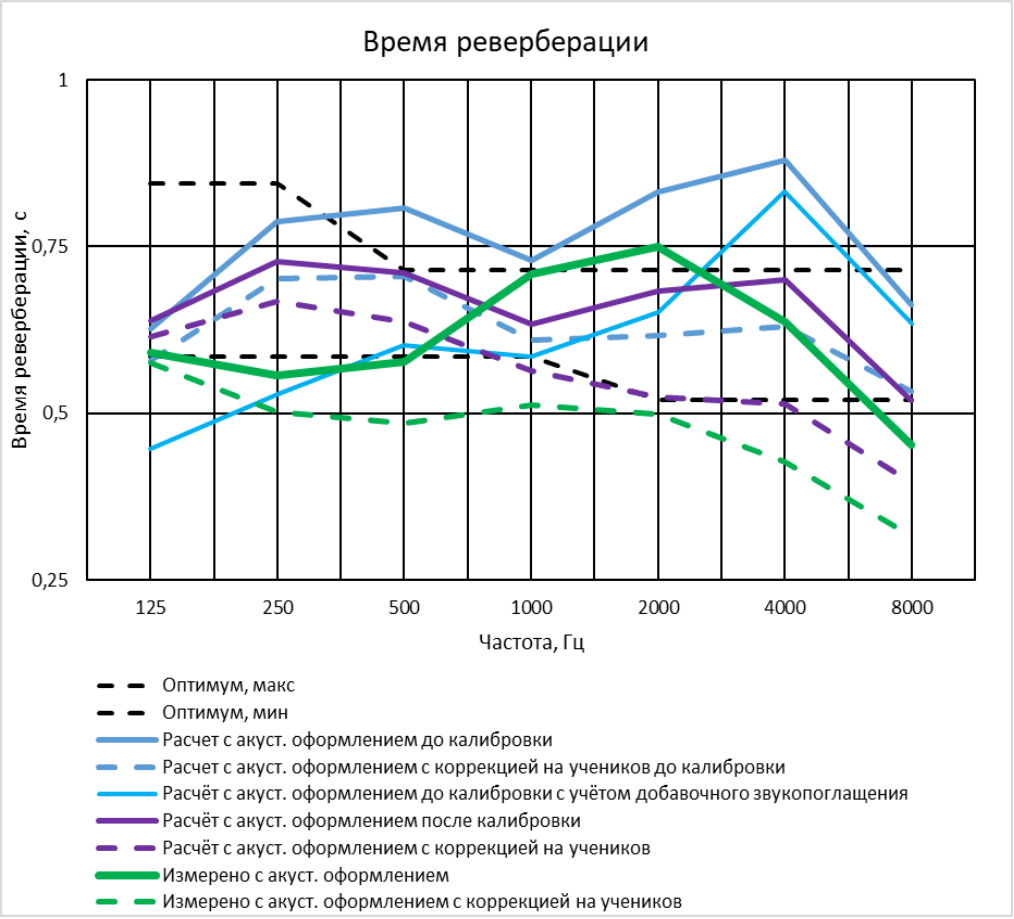


Рис. 5. Сопоставление результатов измерений времени реверберации с расчетными значениями для помещения с акустическим оформлением

Такие результаты, объясняются совокупностью следующих факторов:

1. значительной сложностью при оценке величины внесенного звукопоглощения элементами интерьера помещения;
2. влиянием даже незначительного отклонения расчетного КЗП от его истинных значений хотя бы для ранее неоткалиброванных поверхностей, при чем как для общестроительных материалов (справочные данные), так и для акустических материалов (данные лабораторных измерений).

Существует методика, позволяющая оценить влияние добавочного звукопоглощения [7]. На рис. 5 представлена коррекция времени реверберации по данной методике для расчетных значений, полученных в модели с акустическим оформлением до калибровки. Однако, расхождение с результатами измерений при данном методе остаются значительными.

Инженерно-приемлемым решением является тонкая калибровка КЗП материалов (рис. 6) для модели с акустическим оформлением. Результаты расчета с учетом откалиброванных значений КЗП представлена на рис. 5.

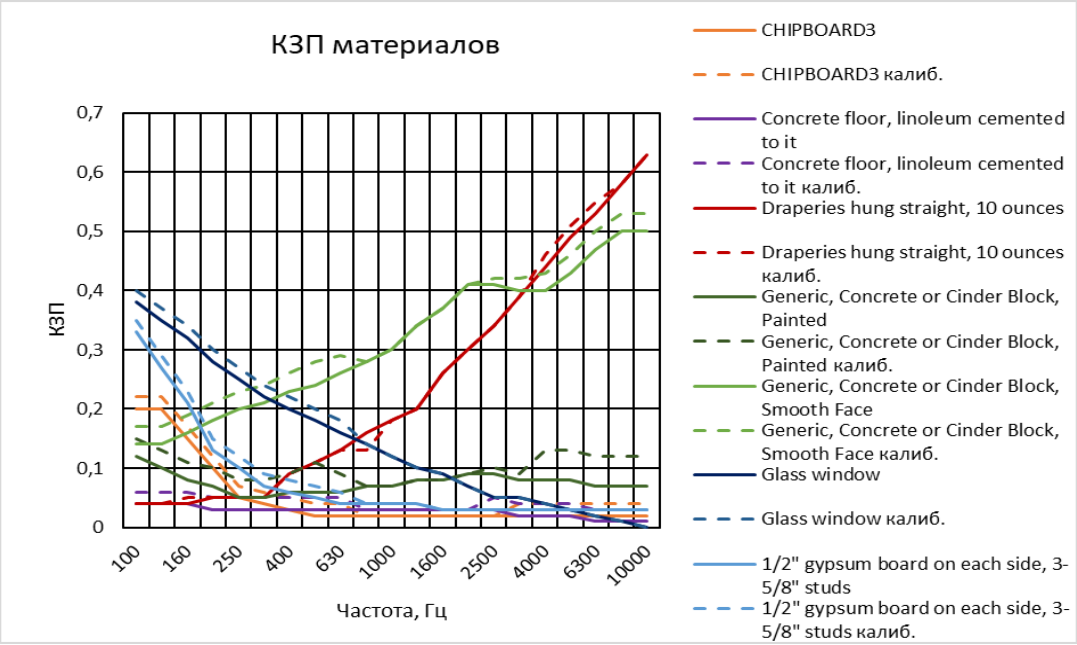


Рис. 6. Откалиброванные значения КЗП материалов в сравнении с стандартными для акустической модели с акустическим оформлением

Заключение

Полученные результаты демонстрируют наличие явных ограничений в точности расчета при акустическом проектировании, которые в значительной степени связаны со сложностями точного определения истинного КЗП поверхностей. При этом, в научно-технической литературе и в нормативно-методических документах отсутствуют методики определения допустимых погрешностей акустического расчета. Такое обстоятельство на

практике может вызывать сложности при оценке качества проведенных акустических расчетов.

В связи с выше сказанным, представляется полезным и даже необходимым движение в направлении разработки методики оценки допустимой (ожидаемой) погрешности акустических расчетов.

Список литературы

1. *Zannin P.H.T., Zwirtes D.P.Z.* Evaluation of the acoustic performance of classrooms in public schools. //Applied Acoustics. 2009. **70**, 626 p.
2. *Шибанов С.А., Барсукова Е.М. Жукова В.О., Фадеев А.С.* Акустическая среда общеобразовательных учебных заведений г. Москвы. // М. Акустика среды обитания. 2021. С. 280.
3. *Жукова В.О., Фадеев А.С.* Время реверберации в типовых школах г. Москвы и Московской области. //М. XXXIV Сессия РАО, 2022. С. 511
4. *Канев Н.Г., Комкмн А.И.* Акустика Учебных Аудиторий. МГТУ им. Н.Э. Баумана. М.: 2019.
5. *Стукало А.А., Субботкин А.О., Алешкин В.М., Тюрин А.С., Числов Д.С.* Определение оптимальных требований к акустическим параметрам в школьных классах // М. Акустика среды обитания, 2025. С. 354.
6. *Стукало, А. А., Алешкин В.М.* Проблемы акустики школьных классов // М. Акустика среды обитания. 2024. С. 381.
7. Руководство по акустическому проектирования залов многоцелевого назначения средней вместимости. М.:Стройиздат. – 47 с.
8. Рекомендации по созданию оптимального акустического режима в учебных помещениях. М.: Стройиздат. 1983. – 48 с.
9. Building Bulletin 93: Acoustic design of schools: performance standards. February 2015.
10. СП 51.13330. 2011 «Защита от шума».

УДК: 534.8.081.7 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39608

Проектирование естественной акустики зрительных залов (рекомендации по разработке свода правил)

А.В. Колмаков[1,a]

[1] *Уральский государственный архитектурно-художественный университет имени Н.С. Алферова. РФ 620075, г. Екатеринбург, ул. К.Либкнехта, д.23*

E-mail: [a]*kolmakov_av@mail.ru*

Аннотация. В статье освещены трудности, с которыми сталкивается архитектор при проектировании или резервировании необходимого объема для зрительных залов. Сделано предложение по формированию нового нормативного документа в котором, в доступной для широкого круга пользователей, будут изложены основные правила формирования формы и размеров зрительных залов с естественной акустикой.

Ключевые слова: свод правил, СП, акустика залов, естественная акустика, проектирование зрительных залов.

Design of natural acoustics in auditoriums (recommendations for developing a set of rules)

A.V. Kolmakov[1,a]

[1] *N.S. Alferov Ural State University of Architecture and Arts. 620075, K. Libknekhta Street, 23, Yekaterinburg, Russian Federation*

E-mail: [a]*kolmakov_av@mail.ru*

Abstract: The article highlights the difficulties faced by architects when designing or reserving the necessary space for auditoriums. It proposes the creation of a new regulatory document that will provide a comprehensive guide for the shape and size of auditoriums with natural acoustics, accessible to a wide range of users.

Keywords: set of rules, SP, hall acoustics, natural acoustics, design of auditoriums.

PACS: 43.10.Sv Образование в области акустики, учебные материалы, представляющие интерес для преподавателей акустики

Введение

На сегодняшний день, при проектировании зального помещения, основной задачей архитектора является корректное резервирование необходимого объема, позволяющего в дальнейшем, совместно с инженером акустиком, успешно завершить проектирование

акустики зрительного зала и создание его интерьера. Для этого архитектор должен знать основные характеристики будущего зала (назначение и вместительность), исходя из которых формируется геометрия и габариты объема зала, с учетом таких основных требований как создание диффузности звукового поля и надлежащей структуры ранних отражений. В результате проведенной работы появляется некая сложная форма зрительного зала достаточного по требованиям объема, которая может быть вписана в более простую фигуру (например, прямоугольный параллелпипед), которую условно можно использовать для создания архитектурного решения здания – определение положения конструкций выгораживающих объем зала и композиционное влияние объема зала на решение фасадов. То есть, корректное определение геометрической формы зала и его объема должно предшествовать созданию основного планировочного решения при проектировании зрелищных зданий.

1. Состояние вопроса

В кулуарах специализированных конференций можно слышать сетования специалистов о постоянных ошибках архитекторов при формировании ими зрительных залов. А также о необходимости переработки проекта, при формировании его акустических качеств. Если суммировать опыт консультационной работы автора статьи со студентами (УрГАХУ) и состоявшимися специалистами (учебный отдел государственной экспертизы Свердловской области), относительно выполнения акустических требований для зрелищных зданий, можно отметить следующие особенности:

1. Выполнение требования зарезервировать необходимый объем заключается в определении требуемого удельного объема (согласно СП 51.13330.2011 и СП 309.1325800.2017), затем определение общего объема, который, в последствии, представляется в виде простейшей фигуры – прямоугольный параллелепипед. И уже эта фигура используется для формирования планировочного решения. То есть, в самом начале работы над проектом закладывается недостаточный объем зала.
2. Форма планировочного решения зала ограничено только композиционным чутьем архитектора – забыты и нарушены требования диффузности звукового поля и физики распространения звука – используются вогнутые поверхности, большие углы раскрытия боковых стен, круглые в плане и сферические в объемном решении залы, и пр.
3. Забыто понятие лучевая картина, необходимость и правила ее построения, а также расчет запаздывания звуковых лучей, выполненный на основе простейших сечений (плана и продольного разреза).

4. О расчете времени реверберации при создании интерьера зала проектировщики вообще не думают. Возможно, это связано с отсутствием данных по коэффициентам звукопоглощения у большинства современных отделочных материалов и конструкций [1-3]. Вопрос качества монтажа акустических материалов и конструкций, также отсутствует. Преобладает ошибочное деление материалов на две категории – поглощающие и не поглощающие звук.

Получается, что проектировщики, в своей основной массе, далеки от вопросов акустических рекомендаций. Возможно, это произошло ввиду отсутствия современных источников, где внятно изложены требования и пошаговая инструкция для проектирования залов. Соответственно необходимость разработки нового свода правил (далее СП) по акустическому проектированию зальных помещений с использованием современных подходов и методов в области архитектурно-строительной акустики уже весьма актуальна [4]. Учитывая это обстоятельство, автором статьи рекомендуется разместить в предлагаемом для разработки СП соответствующий раздел позволяющий архитектору корректно сформировать геометрию и габариты будущего зала. Учитывая специфическую необходимость предлагаемого раздела, возможно, имеет смысл издать отдельный документ (например, ГОСТ), который условно можно назвать «Правила проектирования геометрической формы зрительных залов».

Данные этого документа позволят человеку далекому от акустики определять архитектурные параметры будущего зала (ориентировочную форму и размеры) с достаточной точностью, чтобы избежать значительных переработок объемного и планировочного решений всего проекта здания в результате взаимодействия с профессиональными инженерами-акустиками.

2. Основное содержание документа (ГОСТа)/ раздела документа (СП)

Формирование правил проектирования геометрической формы зрительных залов может включать в себя рекомендации изложенные в источниках, которые были опубликованы в 1980-е годы, когда у акустики, как науки, был расцвет. На сегодняшний день они, в этом вопросе, не потеряли своей актуальности. Если посмотреть на содержание документа «Руководство по акустическому проектированию залов многоцелевого назначения средней вместительности» (1981 г.), можно отметить п. 2 «Акустические требования к воздушному объему, форме и очертаниям внутренних поверхностей зала», где достаточно подробно изложена методика формирования объемного решения зала, состоящая из 8-ми подпунктов (воздушный объем; общие пропорции и длина; допустимое запаздывание ранних звуковых отражений; правильное распределение отраженного звука; предотвращение концентрации

отраженного звука; обеспечение достаточной диффузности звукового поля; балконы; профиль пола) [5]. Автор статьи призывает использовать копирование содержания предшествующих изданий как основу документа (или раздела документа). В защиту этого решения можно сказать следующее - в случае работы с актуальным ГОСТом или СП архитекторы, используя базы данных нормативных документов, будут получать необходимую информацию практически мгновенно. Кроме того сомнений в актуальности полученной информации у них не возникнет.

Конечно, рекомендации, почерпнутые из изданий 1980-х гг. должны быть оценены и переработаны специалистами в области акустики в соответствии с достижениями современной науки. В дальнейшем, скорее всего, сформулированные акутуализированные и узаконенные рекомендации будут автоматизированы с использованием доступных, с точки зрения стоимости, программных продуктов (далее ПП). Например, в отличии от специализированных ПП использующих для моделировании трассировки лучей, таких как AFMG EASE, ODEON, CATT-Acoustic и пр., можно предложить отечественный редактор векторной графики типа NanoCAD, где при создании графики интерактивные таблицы могут представить промежуточные и конечные цифры вычислений при определении геометрической формы зала. Стоит отметить, что вычисления будут проводиться по упрощенным параметрам, например на характерном плане и разрезе зала полуавтоматическим способом можно будет формировать лучевые картины. В будущем такие решения могут быть реализованы в качестве специализированных ПП или плагинов в составе редакторов векторной графики отечественного производства.

Заключение

Появление пошаговой инструкции для создания сложной формы объемного решения зрительного зала, представленного в виде нормативного документа, будет способствовать появлению нового требования при прохождении экспертизы проекта, что конечно же скажется на, как минимум, временных затратах проектировщика. Однако, стоит отметить, что в целом это требование повысит культуру проектирования и позволит архитекторам корректно резервировать пространство зала под заявленное назначение и количество зрителей, а инженерам акустикам не придется искать компромиссные решения при последующей детальной проработке проекта акустики зала.

Список литературы

1. *Колмаков, А. В.* Методы формирования баз данных акустических материалов / А. В. Колмаков // Новые информационные технологии в архитектуре и строительстве : Материалы VIII Международной научно-практической конференции, Екатеринбург, 13–

14 ноября 2025 года. – Екатеринбург: Уральский государственный архитектурно-художественный университет им. Н.С. Алфёрова, 2025. – С. 23. – EDN SUYYCX.

2. *Колмаков, А. В.* Номенклатура современных акустических материалов, перспективы формирования единой базы данных / А. В. Колмаков // Акустический журнал. – 2025. – Т. 71, № S5. – С. 40. – EDN KGLHBE.
3. *Колмаков А.В., Игнатьева В.О.* Формирование электронной базы данных современных акустических материалов // Мат. VII Межд. науч.-практ. конф. «Новые информационные технологии в архитектуре и строительстве», 7–8 ноября 2024 г. Екатеринбург: УрГАХУ, 2024. С. 48. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_74528271_90469033.pdf (дата обращения: 10.06.2025).
4. *Алешкин, В. М.* Факторы, влияющие на точность акустического проектирования зальных помещений / В. М. Алешкин, А. В. Перетокин // Сборник трудов, посвященных памяти академиков РААСН В.М. Бондаренко и Г.Л. Осипова : Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика РААСН В.М. Бондаренко и Материалы Международной научной конференции, посвященной памяти академика РААСН Г.Л. Осипова, Москва, 01–03 июля 2025 года. – Москва: Российская академия архитектуры и строительных наук, 2025. – С. 356-367. – EDN FKXQCQ.
5. Руководство по акустическому проектированию залов многоцелевого назначения средней вместительности/ НИИСФ Госстроя СССР. – 2-е изд., исправл. И доп. – М.:Стройиздат, 1981. – 47 с.

УДК:534 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39609

Акустические проблемы многофункциональных залов и способы их решения

А.Я. Лившиц[1,a], **А.С. Фадеев**[1,b]

[1] *ООО «Проектный Институт Строительной Акустики»,*

115054, г. Москва, ул. Новокузнецкая, д. 33, стр. 2.

E-mail: [a]al@acoustic.ru, [b]af@ acoustic.ru ,

Большинство проектов новых и реконструируемых зрительных залов предусматривают, что они будут эксплуатироваться, как многофункциональные, что влечёт за собой разные акустические требования к ним. Прежде всего, это касается разного времени реверберации в зале при неизменном воздушном объеме. К этому добавляется желание заказчика получить зал с неизменным или малозаметным изменением интерьера. В статье описаны известные способы изменения времени реверберации в зале механически и виртуально с указанием на их плюсы и минусы. Приведён новый механический запатентованный способ управления акустическими характеристиками зала с приведением акустических характеристик, измеренных в большой реверберационной камере. Дано сравнение с известными способами.

Ключевые слова: многофункциональный зал, время реверберации, изменяемая акустика залов.

Acoustic problems of multifunctional halls and ways to solve them

A.Y. Livshits[1,a], , **A.S. Fadeev**[1,b]

[1] *«Building Acoustics Design Institute» LLC. Moscow 115054, Russia.*

E-mail: [a]al@acoustic.ru, [b] af@acoustic.ru

Most projects of new and reconstructed auditoriums envisage that they will be operated as multifunctional, which entails different acoustic requirements for them. First of all, this applies to different reverberation times in the hall with a constant air volume. Added to this is the customer's desire to get a room with a permanent or subtle interior change. The article describes known ways to change the reverberation time in the hall mechanically and virtually, indicating their pros and cons. A new mechanical patented method for controlling the acoustic characteristics of a hall with reduction of acoustic characteristics measured in a large reverberation chamber is presented. A comparison with known methods is given.

Keywords: multifunctional hall, reverberation time, variable acoustics of halls.

Введение

В настоящее время большинство строящихся и реконструируемых зрительных залов создаются как универсальные, как по использованию (драматические, музыкально-драматические, оперы и балета, концертные, концертные с органом), так и по акустическому назначению. В залах предполагается проводить часть постановок и концертов с использование системы звукоусиления, а часть без этих систем. Подобная универсальность позволяет использовать зал с максимальной загрузкой и проводить в них мероприятия различной жанровой направленности, удовлетворяя интересам самого широкого слоя публики.

Однако осуществление в одном зале различных по акустическим требованиям постановок часто приводит к акустическому дискомфорту. Время реверберации при проведении органных и симфонических концертов, оперных постановок должно быть существенно выше, чем время реверберации во время проведения концертов популярной музыки со звукоусилением и драматических спектаклей со звукоусилением и без него. Особенно это касается низкочастотного спектра (до 250 Гц), так как отношение времени реверберации на низких частотах к реверберации на средних и высоких (показатель BR) для залов без звукоусиления должен быть более единицы (оптимально 1,05…1,15). Для залов со звукоусилением время реверберации во всем диапазоне должно быть максимально выровненным.

1 Существующие методы акустической коррекции

Для приспособления залов к постановкам с различными требованиями к времени реверберации есть несколько возможностей. Это подъемно-опускные шторы вдоль стен, поворотные элементы отделки стен, использование систем виртуальной акустики.

Принцип действия этих систем и расчетные и измеренные диапазоны изменения времени реверберации в залах приведены в работе [1].

Подъемно-опускные шторы имеют два недостатка. Во-первых, они существенно изменяют архитектурное решение зала в рабочем положении (положение с опущенными шторами). Во-вторых, они не обладают высоким звукопоглощением при разумной многослойности (1-2 слоя с относом от стены до 150 мм и расстоянием между слоями 100-200 мм), и их звукопоглощение максимально на средних и высоких частотах. Принцип поворота элементов стен не нашёл широкого распространения в России (СССР) по всей видимости из-за технической сложности его воплощения и недостаточной надёжности эксплуатации. В рабочем (раскрытом) положении поворотные элементы так же существенно изменяют архитектуру зала. Результаты измерения звукопоглощения одного такого элемента в раскрытом состоянии приведены на Рис. 1 и взяты из источника [2]. Измеренная конструкция представляет собой металлический каркас (Рис. 2), выполненный в форме

треугольной призмы, основанием которой является прямоугольный треугольник с углом 29 град. Облицовка каркаса выполнена из листов гипсокартона толщиной 12,5 мм в 4 слоя, склеенных между собой по всей площади примыкания и скреплённых саморезами. Внутренняя полость гипсовых панелей, как и пол реверберационной камеры под каркасом, были заполнены звукопоглощающими плитами «Акуфон» 2х50 мм, итого 100 мм. Размеры конструкции – 2,7х4,5 м. Площадь, занимаемая конструкцией – 12,1 м^2.

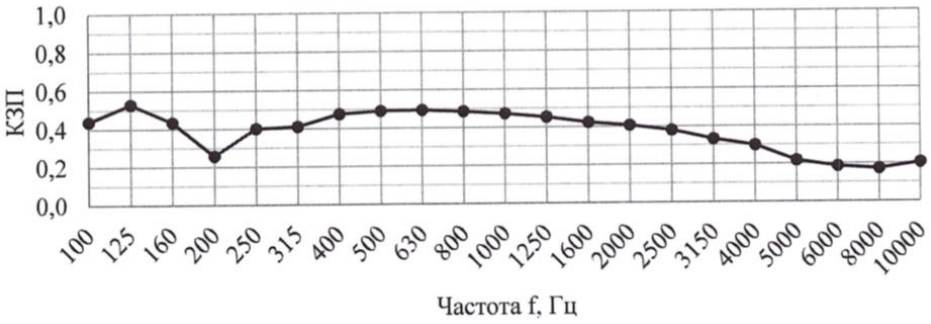


Рис. 1. Коэффициент звукопоглощения поворотной стеновой конструкции в пересчёте на площадь пола под конструкцией

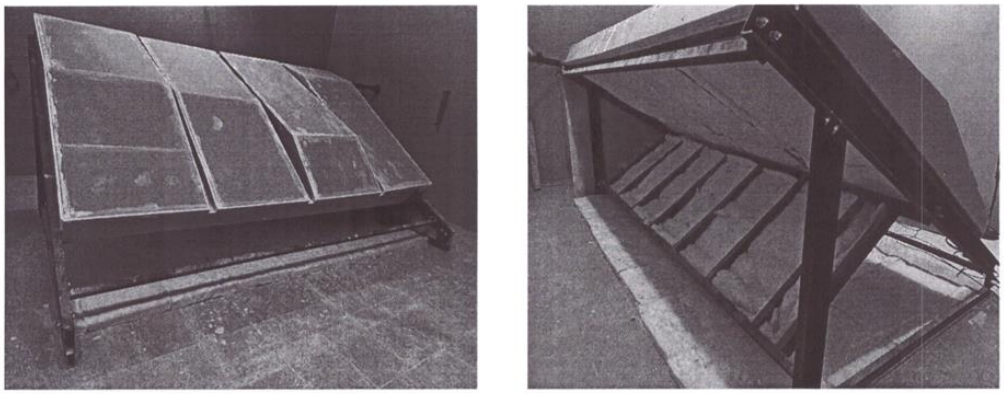


Рис.2 Внешний вид поворотной стеновой конструкции

2 Новый метод акустической коррекции

Для решения задачи создания конструкции, позволяющей изменять коэффициент звукопоглощения своей поверхности в широких пределах, в том числе в низкочастотном диапазоне, и при этом малозаметно менять интерьерное решение зала, была разработана конструкция, состоящая из отдельных элементов, часть которых может перемещаться перпендикулярно плоскости фасада ограждения зала (стен, потолка). Перемещения могут производиться как внутрь каркаса, на котором закреплены облицовочные элементы, так и наоборот – часть элементов может выдвигаться наружу. При этом все видимые фасадные элементы облицовки выполнены из плотного массивного материала, например из гипса, или многослойных, склеенных по всем плоскостям, панелей. Если элементы перемещаются наружу, то за ними перемещается звукопоглощающий материал (например, минеральная вата), который помещён на всю глубину каркаса за перемещаемым элементом. Если элементы перемещаются внутрь, то звукопоглощающий материал размещён в пространстве

за неперемещаемыми элементами. На Рис. 3 показан принцип работы такой конструкции при перемещении элементов внутрь. На Рис. 4 – фото конструкции в большой реверберационной камере в положении, когда элементы выдвинуты наружу в шахматном порядке, на Рис. 5 – в линейном порядке.

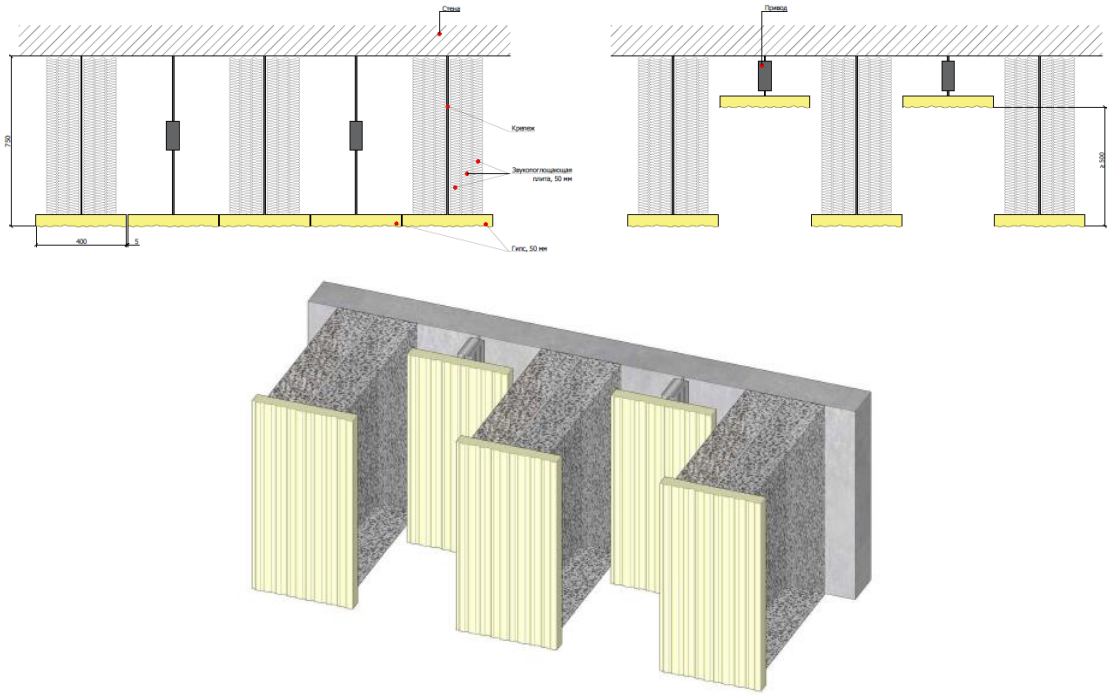


Рис. 3. Принцип работы элементов переменной акустики с перемещением фасадных панелей отделки зала внутрь



Рис. 4. Фото конструкции переменной акустики в большой реверберационной камере в положении, когда элементы выдвинуты наружу в шахматном порядке



Рис. 5. Фото конструкции переменной акустики в большой реверберационной камере в положении, когда элементы выдвинуты наружу в линейном порядке

Конструкция с перпендикулярно выдвигаемыми элементами была облицована 4 слоями гипсокартона толщиной 12,5 мм (общая толщина 50 мм) с проклейкой всех плоскостей примыкания. Выдвигаемые короба размером 600x920 мм (всего 24 шт.) были заполнены звукопоглощающим материалом «Шуманет БМ» толщиной 50 мм в 5 слоев с воздушными зазорами по 50 мм между слоями. Контур короба закрыт материалом «Спанбонд». По контуру образца устанавливался отражающий барьер из четырех слоев гипсокартонных листов «Акулайн» толщиной по 12,5 мм каждый (общей толщиной 50 мм). Отражающий барьер полностью закрывал воздушные полости под образцом. Контур образца в месте примыкания к барьеру и швы между отдельными листами барьера заделывались гипсом.

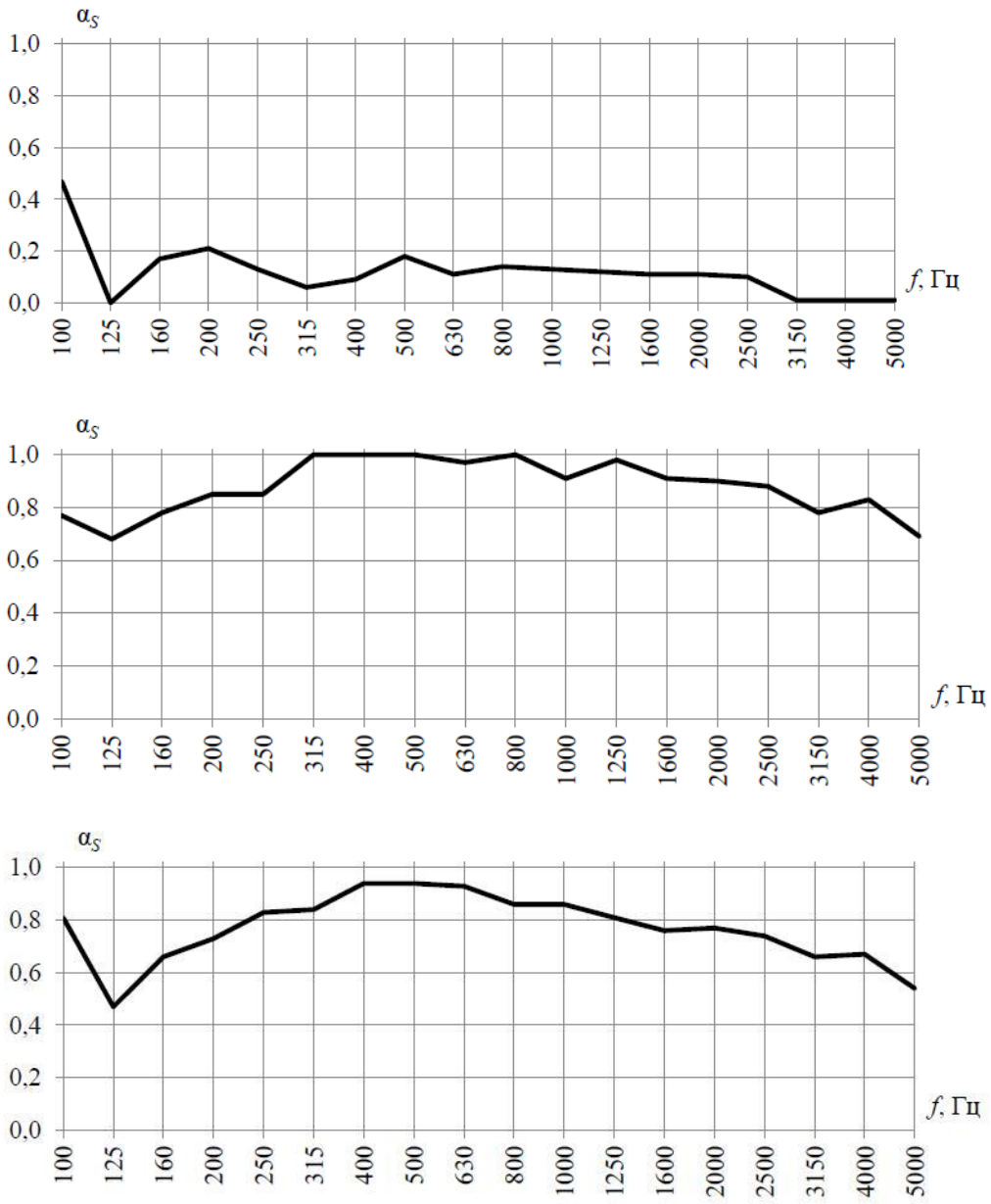


Рис. 6. Коэффициент звукопоглощения элемента переменной акустики

А – Сложенное (собранное) положение; Б – Раскрытое положение, соответствующее схеме Рис. 4 (шахматный порядок); В – Раскрытое положение, соответствующее схеме Рис. 5 (линейный порядок)

Ширина образца 3,70 м, длина 3,82 м. При определении звукопоглощения в качестве площади образца принята площадь верхней поверхности образца или площадь пола под ним - 14,13 м^2.

На Рис. 6А приведен график коэффициента звукопоглощения испытуемой конструкции с плоским фасадом, когда ни один из элементов не выдвинут. На Рис. 6Б приведен коэффициент звукопоглощения конструкции в положении, когда половина элементов (размерами 600х920 мм каждый) находятся в максимально выдвинутом положении в шахматном порядке.

На Рис. 6В приведён коэффициент звукопоглощения конструкции, когда половина элементов выдвинута в линейном порядке. Все коэффициенты звукопоглощения приведены к фасадной поверхности конструкции – 14,13 м^2.

Как видно из приведённых графиков, испытуемая конструкция показала высокую эффективность. Так, её коэффициент звукопоглощения, приведённый к плоскому фасаду, практически в два раза превышает коэффициент звукопоглощения поворотной конструкции. Особенно ценно то, что конструкция с перпендикулярно выдвигаемыми элементами обладает высокой поглощающей способностью и в низкочастотном диапазоне (октавные полосы со среднегеометрическими частотами 125 и 250 Гц) составляют значения 0,7-0,85. Высокого значения звукопоглощения на низких частотах трудно достичь применением поворотных элементов из-за технической сложности включения в работу ватного звукопоглотителя большой толщины. На частотах выше 250 Гц звукопоглощение конструкции с перпендикулярным перемещением элементов фасада близко к 100%.

Заключение

Предложенная конструкция переменного звукопоглощения защищена патентами РФ № 2856645 и № 2856657.

Список литературы

1. *Сучкова Д.М., Фадеев А.С.* – Обзор концертно-зрительных залов России с переменной акустикой // Труды IX конференции «Акустика среды обитания», 2024, с. 390-400.
2. ОТЧЁТ по результатам научно-технической работы на тему «Исследование звукопоглощающих свойств трансформируемой акустической конструкции в реверберационной камере». Москва, НИИСФ, 2025 г.
3. ОТЧЁТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ № 2017\01\31 по теме «Научные исследования звукоизоляционных и звукопоглощающих свойств акустических материалов, изделий и конструкций» (промежуточный, этап №2)», Нижний Новгород, 2025 г.

УДК: 534.843 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39610

АКУСТИКА КОНФЕРЕНЦ-ЗАЛА МУЗЕЯ «АТОМ» НА ВДНХ

Алешкин В.М. [1,2], Числов Д.С.[1,3]
[1] *ООО «АС-Акустик», г. Москва;*
[2] *Научно-исследовательский институт строительной физики (НИИСФ РААСН), г. Москва;*
[3]*Московский технический университет связи и информатики (МТУСИ), г. Москва;*
E-mail: wsjk@mail.ru

В работе представлены результаты натурных акустических измерений для конференц-зала вместимостью 300 человек в музее «АТОМ» на ВДНХ в Москве, открытом в 2023 г. Измеренные параметры сопоставляются с рассчитанными показателями на стадии проектирования с применением математического моделирования в ПО AFMG EASE. По итогам сравнительного анализа делаются выводы о точности акустических расчетов в модели и возможных причинах расхождения результатов расчетов и измерений. Оценка производится для таких параметров как время реверберации (T30), индекс передачи речи (STI) и других локальных критериев.

Ключевые слова: архитектурно-строительная акустика, акустика конференц-залов, время реверберации, индекс передачи речи, акустическое моделирование, акустические измерения

ACOUSTICS OF THE CONFERENCE HALL OF THE ATOM MUSEUM AT VDNKH

V.M. Aleshkin[1,2], D.S. Chislov[1,3]
[1] AS-Acoustic LLC, Moscow, Russia;
[2] Research Institute of Building Physics (NIISF RAASN), Moscow, Russia;
[3] Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia;
E-mail: wsjk@mail.ru

This paper presents the results of in-situ acoustic measurements for a 300-seat conference hall in the ATOM Museum at VDNKh in Moscow, opened in 2023. The measured parameters are compared with the values predicted at the design stage using mathematical modeling in AFMG EASE. Based on the comparative analysis, conclusions are drawn regarding the accuracy of the acoustic model and the possible causes of discrepancies between prediction and measurement. The assessment covers reverberation time (T30), speech transmission index (STI), and other local criteria.

Keywords: architectural acoustics, conference hall acoustics, reverberation time, speech transmission index, acoustic modeling, acoustic measurements
PACS: 43.55.-n; 43.55.Br; 43.38.Tj

Введение

Современные многофункциональные конференц-залы музеев и общественных центров в большинстве случаев работают преимущественно в электроакустическом режиме. Для таких помещений решающими становятся не только глобальные статистические

параметры, прежде всего время реверберации, но и локальные показатели, определяющие разборчивость речи, распределение ранних отражений и равномерность звукового поля при работе системы звукоусиления [3-6].

Конференц-зал музея «АТОМ», открытого в Москве 2023 г. на ВДНХ, представляет интерес как пример сравнительно компактного речевого зала с выраженной архитектурной индивидуальностью, балконом и распределенной системой звукоусиления. На стадии проектирования для зала была построена компьютерная модель в ПО AFMG EASE и сформированы рекомендации по акустической отделке. После ввода объекта в эксплуатацию были выполнены контрольные натурные измерения.

Цель настоящей работы - сопоставить расчетные и измеренные параметры акустики зала, оценить точность акустического моделирования для подобных объектов и выявить факторы, влияющие на расхождение между прогнозом и натурными данными.

Описание зала

Зал имеет в плане форму треугольника с усеченными углами, с осью симметрии вдоль высоты треугольника, опущенной из прямого угла. За сценой располагается медиэкран во всю высоту задника, состоящий из двух частей, расположенных под прямым углом друг к другу. Расстояние от портала сцены до тыловой стены составляет 13 м; ширина по порталу сцены - 16.9 м, по тыловой стене - 23.5 м, максимальная ширина - 33.1 м; средняя высота - около 7.5 м; воздушный объем - порядка 2300 м^3. В зале имеется балкон глубиной 4.5 м.

Основное назначение помещения - речевые мероприятия со звукоусилением. Вместимость зала, включая балкон, составляет около 300 мест. Пол в зале выполнен с ковровым покрытием по фальшполу, зрительские кресла - полумягкие, с кожаной отделкой, с возможностью перемещения (для трансформации в зависимости от типа мероприятия). Вид зала и его план показаны на рис.1.



Рис.1. Вид конференц-зала музея «Атом» во время измерений (*а*) и план зала (*б*)

Потолок в основной части зала и под балконом выполнен подвесным, из

стекломагнезитовых панелей, с укладкой минваты с их тыльной стороны. Потолок над балконом выполнен также подвесным, но из звукопоглощающих панелей на основе каширования стеклоколокна. Боковые участки стен от портала сцены до балкона выполнены звукоотражающими панелями по каркасу с заполнением минватой с устройством декоративных реек. Остальные части боковых стен и тыловые стены над и под балконом выполнены акустическими панелями с линейной перфорацией по каркасу с заполнением минватой. В центральной части тыловой стены под балконом имеется раздвижная перегородка, соединяющая зал с фойе, выполненная из неперфорированных панелей по каркасу. Передний край балкона выполнен древесноволокнистыми панелями с устройством декоративных реек, ограждения выполнены из стекла. Ограждения по краям сцены выполнены декоративными жесткими панелями по каркасу без заполнения минватой. В пределах сценического пространства потолок выполнен из звукопоглощающих панелей аналогично балкону, стены – из древесноволокнистых акустических панелей по каркасу с минватой.

Анализ требований к залам со звукоусилением

Согласно своду правил [1], рассматриваемый зал по назначению может быть отнесен к категории «5» («лекционные и конференц-залы, …») и с учетом его воздушного объема оптимум времени реверберации в диапазоне 500-1000 Гц должен составлять около 0.95 с. Следует отметить, что в данном своде правил не выделена отдельная подкатегория залов, работающих исключительно в электроакустическом режиме, хотя для подобных объектов допустимо и даже полезно более низкое время реверберации, а для речевых залов (лекционные залы, конференц-залы, залы заседаний и пр.), к которым можно отнести и рассматриваемое помещение – горизонтальная частотная характеристика времени реверберации, даже с некоторым снижением в области низких частот.

В качестве дополнительного интегрального признака спектрального баланса удобно использовать показатель Bass Ratio (BR), показывающий соотношение вклада низких и средних частот в спектре времени реверберации. В классической акустике концертных залов значения BR рекомендуется обеспечить порядка 1.1-1.3, что обеспечивает обычно связывают с достаточной «теплотой» звучания музыки [8]. Для речи же рекомендуются значения не выше 0.9-1.0 (горизонтальная характеристика реверберации или со спадом в области низких частот).

Кроме того, для подобных залов основными критериями являются дополнительные локальные критерии акустического качества и их значения, рассчитанные при работе звукоусиления, прежде всего – индекс передачи речи STI, определяемый стандартом [2] и

упоминаемый в СП по акустическому проектированию общественных зданий [3], а также индекс ясности речи C50 [5,6].

Результаты измерений и их анализ

Натурные измерения акустики в зале были произведены по методике [5] на ненаправленном источнике (для измерений времени реверберации и оценки локальных критериев в режиме естественной акустики), а также на системе звукоусиления. Приемный микрофон устанавливался в 9 точках в партере и в 4 точках на балконе.

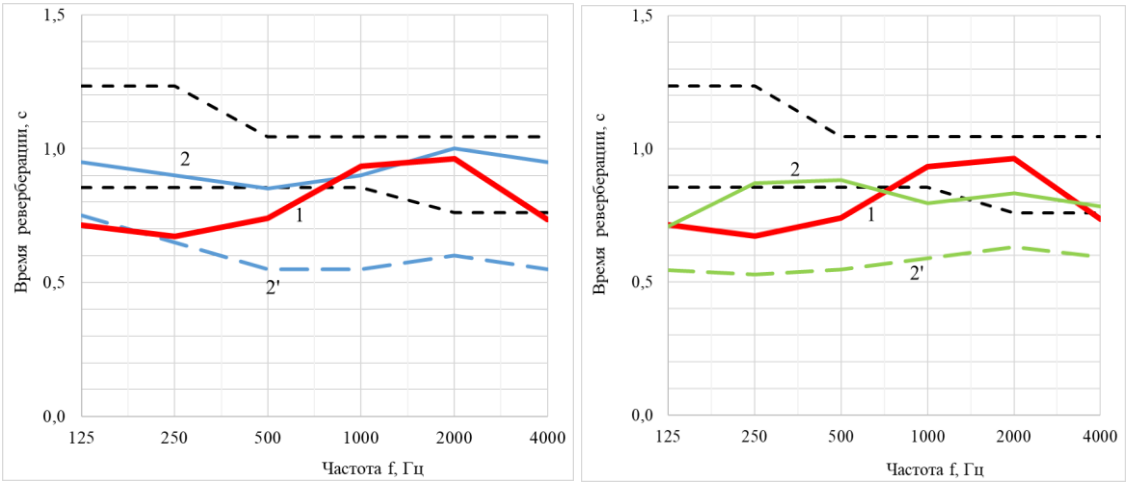
На рис. 2, *а* показано сравнение измеренного и расчетного времени реверберации в зале в сравнении с заданным коридором оптимумов [1]. Расчетные значения приводятся для двух методов – статистического (по формуле Эйринга) и лучевого моделирования (EASE AURA). Из графика следует, что в области средних частот измеренное время реверберации (красная кривая) хорошо совпадает с результатами моделирования (синяя кривая), в то время как в области низких частот наблюдается заметный спад относительно расчетных значений.

Статистический расчет (пунктирная синяя кривая) показывает значительно меньшие значения, что является характерным явлением для детализированных моделей с наличием участков с высокими коэффициентами звукопоглощения (КЗП), вносящих дополнительный фонд звукопоглощения при статистическом расчете, но не принимающих полноценного участия в формировании реверберационного отклика при расчете лучевым методом. Поэтому значения, полученные путем моделирования лучевым методом в области средних и высоких частот, обычно принимаются в качестве более приближенных к реальным.

Отклонение расчетных и измеренных значений времени реверберации может быть связано с двумя основными факторами: 1) несоответствие фактической отделки некоторых участков зала, заданным при акустическом проектировании, и 2) несоответствие фактических КЗП материалов и конструкций в зале заданным при расчетах. Поскольку в рамках строительно-монтажных работ сопровождение со стороны акустиков не осуществлялось, то проконтролировать глубину, заполнение каркаса и проектное соответствие материалов отделки (толщина и вес панелей) на момент обследования уже не представлялось возможным. По результатам визуального осмотра были выявлены некоторые несоответствия отделки (передний край балкона фактически выполнен из древесноволокнистых панелей, в то время как в расчетах учитывались панели с линейной перфорацией); глубина и заполнение каркаса за перфорированными и неперфорированными панелями стен и потолка может отличаться от заданной в расчетах; фактическая отделка потолка под балконом также отличалась от проектной. Однако еще большую неопределенность представляют сведения о фактических КЗП отделки зала. Из результатов следует, что основное расхождение лежит в области 125-500 Гц.

В акустическую модель зала был внесен ряд корректировок, в частности были скорректированы КЗП для панельной отделки стен и потолка в пользу справочных данных, имеющих больший подъем КЗП в области низких частот. Также участки ограждения балкона и потолка под балконом в модели приведены в соответствие с предположительной конструкции фактической отделки.

На рис.1, б приводится сравнение расчетных значений времени реверберации в скорректированной модели с результатами измерений. Видно, что в полосе 125 Гц совпадение улучшилось, однако в полосах 250-500 Гц по-прежнему имеет место расхождение. Кроме того, в связи с внесенными корректировками расчетные значения в области 1-2 кГц оказались ниже измеренных. Сохраняющиеся отклонения измерений и расчетов можно связать с неопределенностью КЗП ключевых участков отделки и конструкций в зале: ковролин на полу; перфорированные панели на стенах; кресла; панельная отделка потолка.



а) *б)*

Рис. 1. Измеренное и расчетное время реверберации Т30 в зале: *а* – сравнение с расчетами по проекту; *б* – сравнение с расчетами с учетом корректировки на фактически выполненную отделку и условия измерений.

Обозначения: 1 – натурно измерено в зале; 2 - моделирование методом прослеживания лучей (AURA); 2′ - статистический расчет по формуле Эйринга

Наибольший эффект в области 250-500 Гц может вносить изменение КЗП перфорированных панелей на стенах зала, составляющих существенную площадь его отделки, за счет фактического увеличения глубины каркаса с заполнением минватой.

Можно отметить, что показатель BR по результатам измерений составил 0.8 – 0.9, что является оптимальным с учетом речевого назначения зала, в то время как расчетные значения составляли порядка 1.0 – 1.1.

Измеренный индекс передачи речи STI (среднее по залу и разброс значений) в сравнении с расчетами в модели показан в таблице 1 для режима естественной акустики (на

ненаправленном источнике) и на системе озвучения. Для обоих режимов как измеренные, так и расчетные значения STI преимущественно соответствуют качественной оценке «хорошо». С учетом более низкой фактической реверберации, индекс в режиме естественной акустики по измерениям оказался выше расчетного, что подтверждает выводы о благоприятности спада в области низких частот для разборчивости речи.

Таблица 1. Индекс передачи речи STI

	Расчет в модели	Измерено в зале
STI, режим естественной акустики (ненаправленный источник)	0,59 (0,51…0,74)	0,67 (0,6…0,74)
STI, электроакустический режим (система озвучения)	0,68 (0,62…0,74)	0,71 (0,67…0,77)

Дополнительно в одной из точек в центре партера были произведены последовательные измерения индекса передачи речи при разных уровнях громкости системы озвучения: уровень звука в точке измерения при включенной системе варьировался от 35 дБА (что соответствовало уровню фоновых шумов в зале) и изменялся с шагом 5 дБ до 65 дБА. На рис.2 показана зависимость измеренного STI в данном режиме, показывающая, что при достижении уровня 50 дБА (что соответствует соотношению «сигнал-шум» около 15 дБА) зависимость STI от уровня системы выходит на насыщение и устанавливается на значении 0.7.

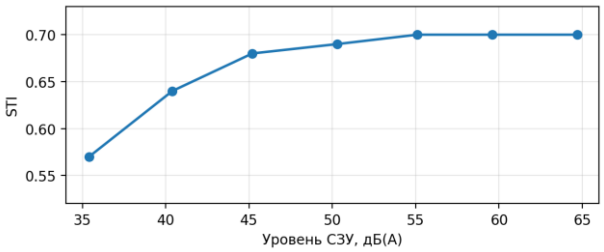


Рис. 2. Зависимость STI от уровня громкости системы озвучения в центре зала

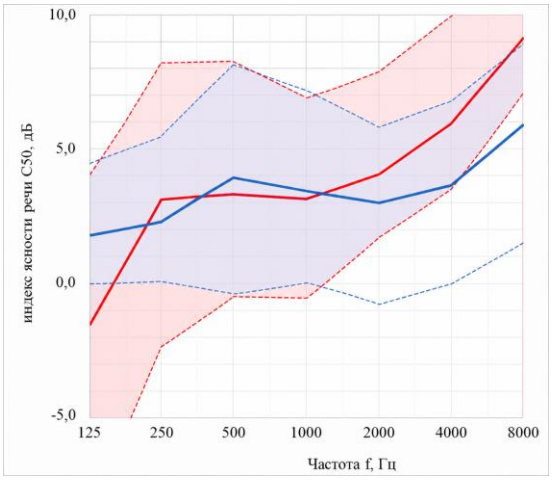


Рис. 3. Индекс ясности речи C50 в зале в электроакустическом режиме: *красный* – измерено в зале; *синий* – расчет в модели. Сплошными линиями показаны усредненные значения, пунктирными линиями – минимальные и максимальные.

Еще одним локальным критерием оценки качества зала для речевых мероприятий является индекс речевой ясности C50. На рис.3 показано сравнение расчетных и измеренных значений (среднее, минимальное и максимальное по точкам измерений/расчета) в частотном распределении. Из результатов следует, что значения C50 составляют около +3 дБ с горизонтальной формой частотной характеристики и показывают хорошее совпадение расчетов с измерениями как по усредненным значениям, так и по диапазону из разброса. Полученные значения свидетельствуют о высокой ясности речи.

Заключение

По результатам анализа результатов измерений в конференц-зале музея «АТОМ» можно сделать вывод о хорошем совпадении значений времени реверберации с расчетными, за исключением отклонения измерений от расчетов в области 250-500 Гц, что может быть связано с неопределенностью данных о КЗП отделки зала и расхождением в проектной и фактически выполненной отделке. Значения локальных критериев (индексы STI, C50) находятся в оптимальных пределах и показывают хорошее совпадение расчетов с измерениями и свидетельствуют о высокой точности метода акустического моделирования с использованием метода прослеживания лучей. Рассчитанный по результатам измерений параметр BR имеет значения 0.8-0.9, что в сочетании с измеренными показателями речевой разборчивости и ясности позволяет сделать вывод о том, что спад времени реверберации в низкочастотной области является благоприятным для речевых залов.

Список литературы

1. СП 51.13330.2011 «Защита от шума»

2. IEC 60268-16:2020. Sound system equipment - Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index.

3. СП 415.1325800.2023 «Здания общественные. Правила акустического проектирования».

4. *Ahnert W., Noy D., Hauser G., Mapp P., Feistel S.* Sound Reinforcement for Audio Engineers. Focal Press, 2022.

5. ГОСТ Р ИСО 3382-1-2013. Акустика. Измерение акустических параметров помещений. Часть 1. Зрительные залы.

6. *Beranek L.L.* Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics, and Architecture. 2nd ed. Springer, 2004.

УДК 534 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39611

Акустические решения зрительных залов новых оперных театров России

Перетокин А.В.[1)], Лившиц А.Я.[1)], Ширгина Н.Г.[1)]

[1)] ООО «Проектный Институт Строительной Акустики», г. Москва

Тел.: +7(968)965-9219; E-mail: anton.peretokin@pistra.ru

В работе рассмотрены 3 зрительных зала строящихся (на момент публикации статьи) оперных театров в Севастополе, Кемерово и Владивостоке в рамках реализации проектов Музейных и театрально-образовательных комплексов. Представлены архитектурно-акустические решения залов, включая объемно-планировочные решения, решения по финишной отделке и трансформации. Проведен сравнительный архитектурно-акустический анализ рассматриваемых залов с существующими историческими мировыми и отечественными оперными залами. Подведены итоги архитектурно-акустического решения залов, сделаны предположения об акустической концепции современного оперного зала.

Ключевые слова: архитектурная акустика, оперный театр, зрительный зал, время реверберации

УДК 534 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39612

ОБ АКУСТИКЕ ИСТОРИЧЕСКИХ ОПЕРНЫХ ЗАЛОВ МОСКВЫ И САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

Лившиц А.Я.[1)], Перетокин А.В.[1)]

[1)] ООО «Проектный Институт Строительной Акустики», г. Москва

Тел.: +7(985)991-2582; E-mail: anatoly.livshits@acoustic.ru

В России оперное искусство несколько столетий не перестает быть популярным. В Москве и Санкт-Петербурге существует несколько зданий оперных театров разновременной постройки классического итальянского типа, которые были реконструированы в разные годы и адаптированы под современные задачи и требования. В статье приведены результаты акустических измерений в 3 зрительных залах: в Большом Театре (Историческая сцена и Новая сцена) в Москве и в Михайловском театре в Санкт-Петербурге. Проведен сравнительный анализ характеристик рассматриваемых залов с другими мировыми залами подобного типа. Сделаны выводы об акустических особенностях, объединяющих залы такого типа.

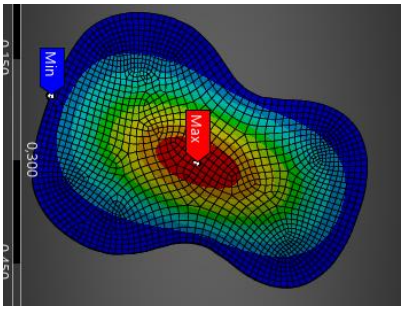
Ключевые слова: архитектурная акустика, оперный театр, зрительный зал, время реверберации

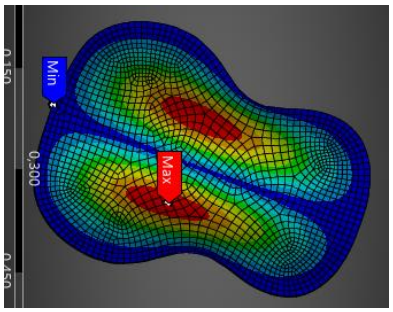
Назад к содержанию секции

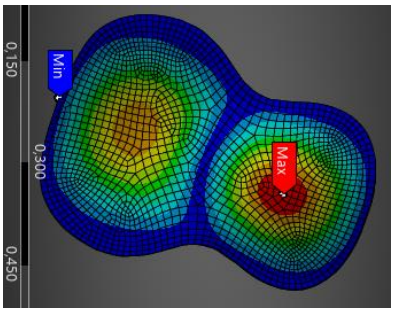
СЕКЦИЯ МУЗЫКАЛЬНАЯ АКУСТИКА











назад к Содержанию

СОДЕРЖАНИЕ СЕКЦИИ МУЗЫКАЛЬНАЯ АКУСТИКА

1. РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ГИТАРНОЙ ДЕКИ
Бачурина И.А., Чунарев А.Ф., Шлычков С.В. 844

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ШКАЛЫ РАВНОМЕРНО-ТЕМПЕРИРОВАННОГО СТРОЯ ДЛЯ НАТУРАЛЬНОГО ЗВУКОРЯДА ПРОИЗВОЛЬНОЙ ФАКТОРИЗАЦИИ
Герасимов Р.А. 851

3. К ВОПРОСУ ИСТОРИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ ДРЕВНЕРУССКИХ ПЕВЧЕСКИХ СТИЛЕЙ В КОНТЕКСТЕ ТИПОЛОГИИ ОТЕЧЕСТВЕННОГО ХРАМОВОГО ЗОДЧЕСТВА
Давиденкова-Хмара Е.Ш. 857

4. ИССЛЕДОВАНИЯ КОНСОНАНСНЫХ СООТНОШЕНИЙ В АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ СТРУННЫХ МУЗЫКАЛЬНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ, ИМЕЮЩИХ АКУСТИЧЕСКИЙ РЕЗОНАТОР, НА ПРИМЕРЕ ГИТАРЫ
Чунарев А.Ф. 863

DOI: 10.34756/GEOS.2026.17.39755

Расчетно-экспериментальное исследование виброакустических полей гитарной деки

И.А. Бачурина[1, a], А.Ф. Чунарев[b], С.В. Шлычков[1, c]

[1] *Поволжский государственный технологический университет,*

Республика Марий Эл, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, д.3, 424000, Russia.

E-mail: [a]bachurinailaria@yandex.ru, [b]guitar176@mail.ru, [c]shlychkovsv@volgatech.net

Аннотация: С помощью метода конечных элементов построены дискретные модели гитарной деки. Дека представляется в виде шарнирно-опертой по контуру пластины. Конструкционный материал рассматривается на основании модели ортотропного тела. Решена задача на собственные значения. Установлен спектр колебаний в диапазоне низших и средних частот. Проанализировано влияние толщины пластины, резонаторного отверстия, формы деки и породы древесины. Представлены результаты натурных экспериментов в виде амплитудно-частотных характеристик акустического давления, созданных заготовками гитарных дек. Механические колебания возбуждались посредством моногармонического силового возбуждения,. Создаваемое пластиной акустическое давление измерялось микрофоном. Результаты расчета виброперемещений согласуются с экспериментальными данными акустических измерений.

Ключевые слова: акустика музыкальных инструментов, дека, спектр колебаний.

A computational and experimental study of vibroacoustic fields of a guitar soundboard

I.A. Bachurina[1, a], A.F. Chunarev[b], S.V. Shlychkov [1, b]

[1] *Volga State University of Technology, pl. Lenina, 3, Yoshkar-Ola, 424000, Russia.*

E-mail: [a]bachurinailaria@yandex.ru, [b]guitar176@mail.ru, [c]shlychkovsv@volgatech.net

Abstract: Discrete models of a guitar soundboard are constructed using the finite element method. The soundboard is represented as a plate hinged and supported along its contour. The structural material is considered based on the orthotropic body model. The eigenvalue problem is solved. The vibration spectrum is determined in the low and mid frequency range. The influence of the plate thickness, sound hole, soundboard shape, and wood species is analyzed. The results of field experiments are presented in the form of amplitude-frequency

characteristics of the acoustic pressure generated by guitar soundboard blanks. Mechanical vibrations were excited by monoharmonic force excitation. The acoustic pressure generated by the plate was measured with a microphone. The calculated vibration displacements agree with the experimental data of acoustic measurements.

Keywords: musical instrument acoustics, soundboard, vibration spectrum.

Введение

Гитара – это связанная упруго-акустическая система, в которой струны являются источником механических колебаний, дека – излучателем звуков, акустическая внутренняя полость с корпусом – усилителем звуковых колебаний [1]. Колебания струн, деки и воздушного давления тесно связаны друг с другом. За длинную историю в области создания акустических гитар накоплен богатый опыт, установлены основные конструктивные параметры. При этом до настоящего времени не известны четкие критерии создания качественных музыкальных инструментов (МИ) и создание уникальных образцов зачастую происходит случайно, либо остается уделом мастеров, хранящих свои наработки в тайне. Очевидно, дальнейшее совершенствование и развитие производства МИ должно быть связано с развитием методов математического моделирования. В наших работах [2-4] построены расчетные конечно-элементные модели корпусных элементов акустической гитары: дека, ребра жесткости, подставка для струн, акустический воздушный резонатор. В них доказывается адекватность модели верхней деки, выявляется влияние подкреплений, натяжения струн на характер спектра колебаний деки. Интегрально оценивается влияние акустической полости. Однако, произвести достоверную оценку разработанных моделей возможности не представлялось. В данной работе проводятся натурные эксперименты с заготовками дек, используемых в дальнейшем для создания акустических гитар. Эти эксперименты стали основой для дальнейшего моделирования методом конечных элементов (МКЭ) и создания расчетных моделей, качество которых можно оценить сопоставлением с экспериментальными данными.

1 Эксперимент

Для проведения экспериментальных исследований был изготовлен специальный вибростенд (см. Рис.1). Тонкостенная панель из древесины ели – заготовка для будущей деки (см. Рис.1, б) зажималась между двумя более массивными панелями толщиной 12 мм с одинаковым вырезом в форме будущей деки акустической гитары (см. рис.1, а). Эта трехслойная «сэндвич-панель», включая заготовку деки, зажатую между панелями восемью болтами, устанавливалась в горизонтальное положение на опоры высотой 10 см.

Конструкция располагалась над звукопоглощающим покрытием, лежащим под ней на полу. На высоте 40 см над декой размещался микрофон для измерений акустического давления.

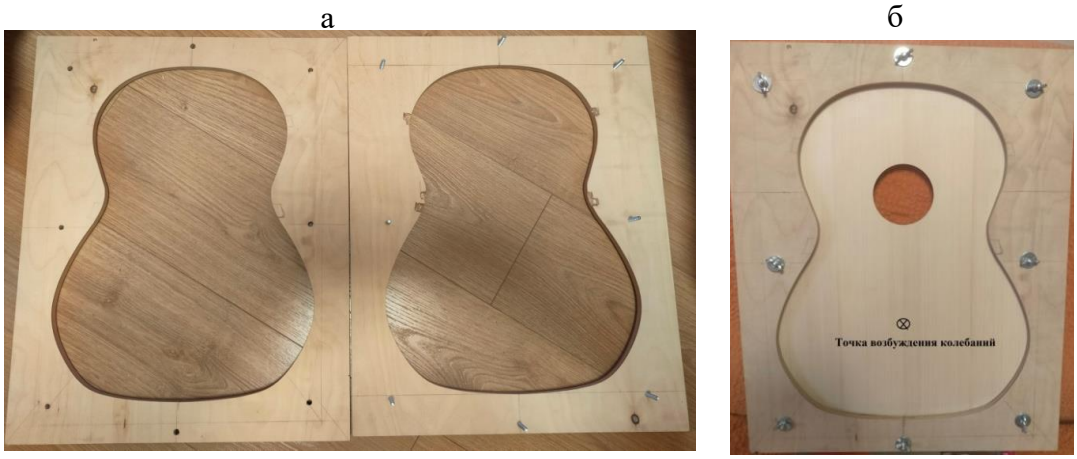


Рис.1. Вибростенд для исследований деки акустической гитары

В колебательное движение дека приводилась посредством специального устройства через небольшой металлический винт, прикрепленный к деке на оси симметрии в зоне расположения подставки для струн [5]. Расположение винта обозначено на рис.1, б, как точка возбуждения колебаний. Таким образом в исследуемом диапазоне до 1 кГц были построены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ), представленные на рис. 3-4.

2. Математическая модель деки

Рассматривается корпус акустической гитары, изготовленной из древесины ели, представляющий собой тонкостенную анизотропную конструкцию. Материал рассматривается на основании модели ортотропного тела [6]. Размеры конструкции представлены на рис. 2, А. Толщина стенки корпуса варьируется от 2,4 до 4,3 мм. Аналитический расчет подобных систем не представляется возможным. В этой связи используется МКЭ.

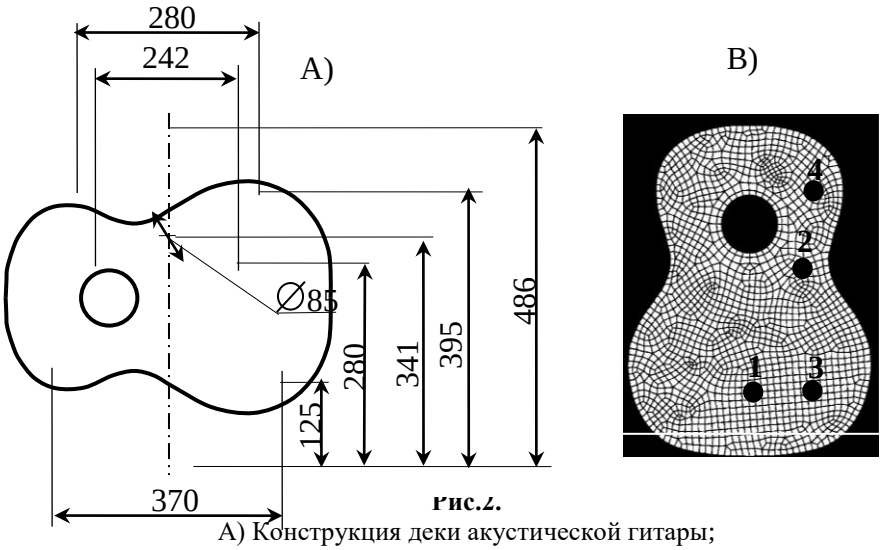


Рис.2.
А) Конструкция деки акустической гитары;
В) Конечно-элементная модель; 1 – точка возбуждения колебаний;1, 2, 3, 4 – контрольные точки для расчета виброперемещений

Дискретная модель, состоит из оболочечных КЭ с шестью степенями свободы в узле (рис. 2, В). Задача динамики описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений $[M]\{\ddot{q}\} + [B]\{\dot{q}\} + [K]\{q\}=\{F(t)\}$. Здесь $[M]$, $[B]$, $[K]$ – матрицы масс, демпфирования, жесткости динамической системы. Порядок матриц равняется числу степеней свободы n = 10000-20000. $F(t) = F_0\sin(pt)$, p – частота вынуждающей силы, F_0 = 1 Н. Рассеяние энергии учитывается при помощи модели вязкого трения с частотно-независимым коэффициентом демпфирования 0,005. Для расчета собственных частот и форм колебаний используется метод итераций в подпространстве собственных векторов.

3. Результаты исследования

Результаты вычислительных экспериментов для дек разных толщин отражены в табл.1. Анализ результатов показывает, что толщина деки линейно связана с величиной собственной частоты: увеличение толщины в два раза приводит к аналогичному изменению собственной частоты. Наличие резонаторного отверстия не меняет данной закономерности, однако способно изменить формы колебаний (см. Табл. 2). 6 форма у деки с отверстием существенно отличается от аналогичной у деки без отверстия. Это меняет поле виброперемещений (рис. 3, *A*, *B*) и соответственно индуцируемое акустическое поле МИ (рис. 3, *C*).

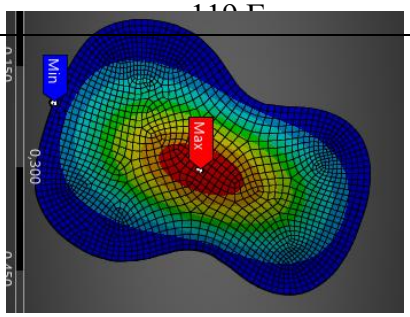
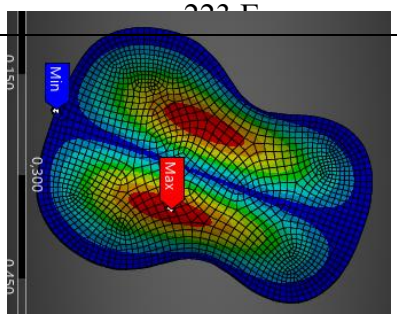
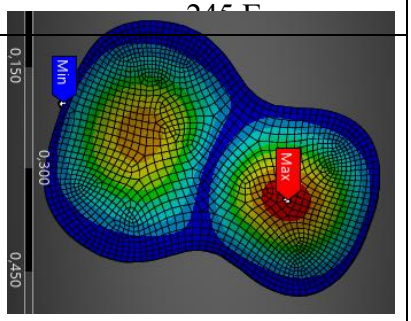
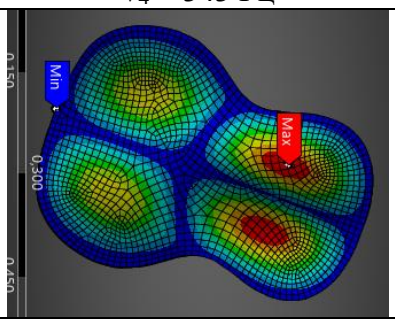
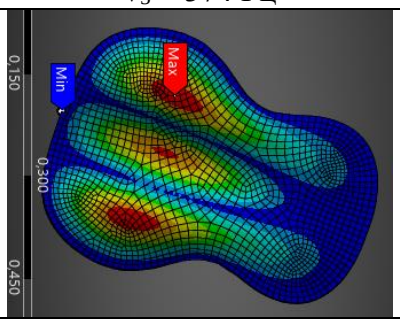
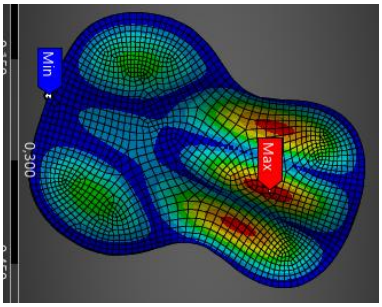
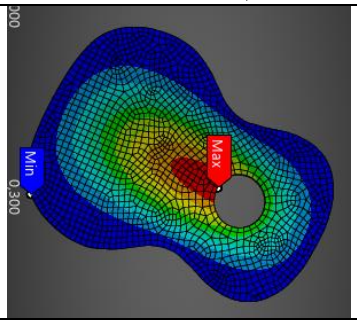
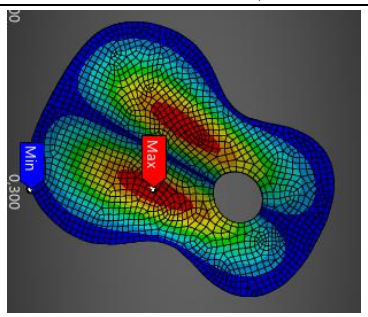
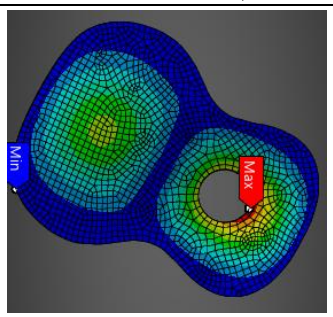
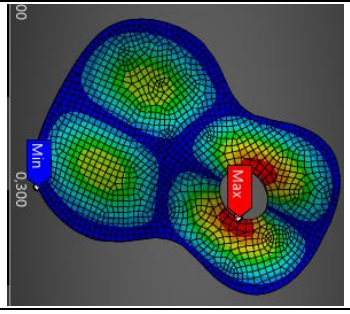
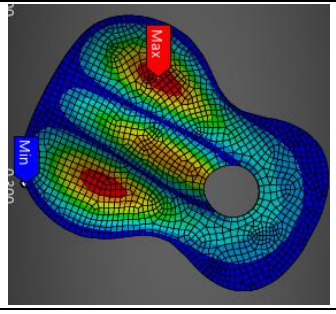
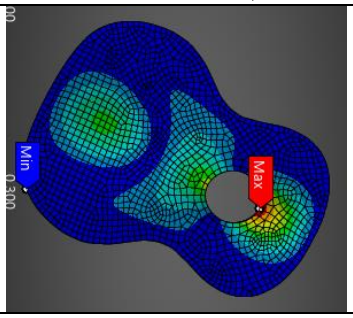
Таблица 1

Собственные частоты, Гц							
Порядковый номер	Дека без резонаторного отверстия					Дека с резонаторным отверстием	
	Толщина пластины h [мм]						
	2,5	3	3,5	4	4,3	2,4	4,3
1.	71	85	98	111	119	65	113
2.	134	159	184	208	223	127	219
3.	144	172	200	228	245	133	235
4.	204	243	282	320	343	191	333
5.	224	267	309	345	374	212	367
6.	302	360	416	471	503	247	427
7.	313	373	432	489	523	297	513
8.	317	379	440	501	536	299	519
9.	371	443	513	583	624	347	607
10.	412	491	568	643	687	382	664
11.	445	528	609	687	733	419	723
12.	462	550	636	720	770	423	727
13.	511	610	708	805	862	468	818
14.	525	624	721	815	869	491	847
15.	564	671	777	880	940	528	913
16.	596	709	821	929	993	569	985
17.	613	728	841	949	1012	576	994
18.	660	783	903	1019	1087	609	1038

19.	679	807	930	1049	1118	652	1115
20.	735	873	1007	1137	1212	683	1173

Данные из таблицы сопоставлены с результатами эксперимента и отражены на соответствующих пиках экспериментальной и расчетной АЧХ на рис.3. Графики для виброперемещений построены в логарифмической шкале. По оси ординат отложена величина $Lg(w/w_{max})$, w_{max} – максимальное виброперемещение контрольной точки.

Таблица 2

Формы колебаний деки из ели без резонаторного отверстия толщиной **4,3 мм**		
119 Гц	223 Гц	245 Гц
		
ν_4 = 343 Гц	ν_5 = 374 Гц	ν_6 = 503 Гц
		
Формы колебаний деки из ели с резонаторным отверстием толщиной **2,4 мм**		
ν_1 = 65 Гц	ν_2 = 127 Гц	ν_3 = 133 Гц
		
ν_4 = 191 Гц	ν_5 = 212 Гц	ν_6 = 247 Гц
		

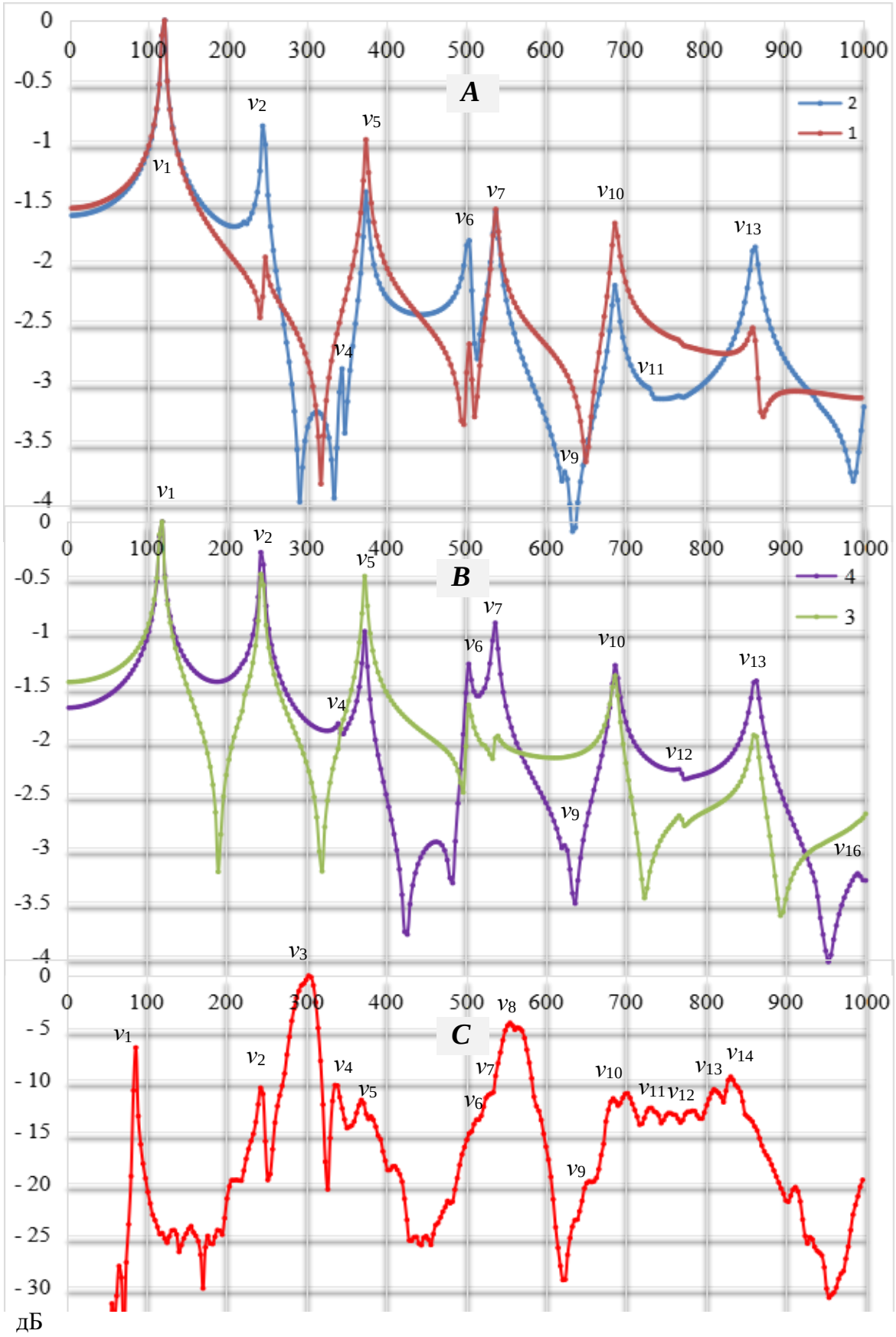


Рис. 3 АЧХ деки толщиной 4,3 мм без резонаторного отверстия
A - Виброперемещения для точек 1 и 2; ***B*** - Виброперемещения для точек 3 и 4;
C - Акустические измерения.

Заключение

Расчеты, проведенные с помощью разработанной КЭ-модели, позволяют в определенных пределах прогнозировать акустические поля создаваемых МИ. Можно изменить конструкционный материал деки и «предсказать» изменение его звучания, обладая достоверными знаниями о физико-механических свойствах используемого сырья. Можно внести изменения в геометрию конструкции и оценить это на стадии проекта. На данном этапе речь идет только низших и средних частотах и модель нуждается в доработке, но те результаты, которые получены позволяют на это рассчитывать.

Список литературы

1. *Римский-Корсаков А.В., Дьяконов Н.А.* Музыкальные инструменты: Методы исследований и расчеты. Мест. пром-сть. М., 1952.
2. *Шлычков С.В.* Расчетно-экспериментальное исследование динамических свойств гитарной деки // Механика композиционных материалов и конструкций. 2001. **7**, №3. С. 389.
3. *Хитров Д.С., Шлычков С.В.* Влияние акустического резонатора на спектр колебаний струнных музыкальных инструментов// Сборник трудов XXXVI сессии Российского акустического общества – М.: ГЕОС, 2024. – С. 453-459.
4. *Шлычков С.В.* Исследование зависимости динамических характеристик тонкостенной панели от ее конфигурации// Акустические измерения и стандартизация. Ультразвук и ультразвуковые технологии. Атмосферная акустика. Акустика океана. Сб. тр. XVI сессии Российского акустического общества, 14-18 ноября, 2005 г., Москва/ М.: ГЕОС. – 2005. – Т. 2. – С. 44–48.
5. Патент на изобретение Российская Федерация. Способ настройки и измерения динамических характеристик струнных музыкальных инструментов и устройство для его осуществления. [Текст] / Чунарев А.Ф.; заявитель и патентообладатель Чунарев А.Ф. – №2416128; заявл. 30.03.2010; зарегистр. в Реестре изобретений 10.04.11.
6. *Ашкенази Е.К., Ганов Э.В.* Анизотропия конструкционных материалов. Машиностроение, Л., 1980.

УДК: 781.1 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39756

Определение оптимальной шкалы равномерно-темперированного строя для натурального звукоряда произвольной факторизации

Р.А. Герасимов

Военный университет радиоэлектроники. 162622, г. Череповец, Советский пр., 126

E-mail: roman-gerasimoff@yandex.ru

Аннотация: в докладе приводится алгоритм нахождения минимального количества ступеней звукоряда равномерно-темперированного строя, аппроксимирующего звукоряд натурального строя с произвольным пределом факторизации (3, 5, 7, 11 и т.д.). Число ступеней равномерно-темперированной шкалы зависит от величины заданной коммы для энгармонически равных звуков и уменьшается с увеличением последней. Показано, что пифагорейский и натуральный (предел 5) строи аппроксимируются 12-ступенной равномерно-темперированной шкалой при задании максимально допустимой «погрешности» звукоряда – пифагорейской коммы и малой диесы соответственно.

Ключевые слова: натуральный строй, микрохроматические строи, комма, энгармонизм звуков, равномерная темперация

Determination of the optimal scale of equal temperament for a natural scale of arbitrary factorization

R.A. Gerasimov

Department of Physics, Military University of Radio Electronics. Cherepovets 162622, Russia.

E-mail: roman-gerasimoff@yandex.ru

Abstract: The report presents an algorithm for finding the minimum number of steps of the equal-tempered scale, approximating the scale of the natural scale with an arbitrary factorization limit (3, 5, 7, 11, etc.). The number of steps of the equal-tempered scale depends on the value of the given comma for enharmonically equal sounds and decreases with the increase of the latter. It is shown that the Pythagorean and five-limit tunings are approximated by a 12-tone equal temperament scale when the maximum allowable «error» of the scale is set to the Pythagorean comma and the lesser diesis, respectively.

Keywords: five-limit tuning, microchromatic scales, comma, enharmonic equivalence, equal temperament

PACS: 43.75.Zz

Введение

История европейской музыкальной традиции — это не только эволюция жанров, стилей и композиторских техник, но и постоянное развитие музыкальных строев. От античных тетрахордов и средневековых церковных ладов через эпоху Возрождения и барокко к классическим темперациям и современности — европейская музыка всегда искала баланс между акустической чистотой и практическим удобством. В XX–XXI веках интерес к микрохроматике — звуковым системам, выходящим за пределы традиционного двенадцатиступенного строя, — открыл новые горизонты для композиторов и исполнителей, позволив обогатить палитру выразительных средств, приблизиться к акустически чистым интервалам, выйти за пределы традиционной тональности, исследовать новые тембровые и гармонические краски, а также переосмыслить саму природу музыкального звука.

Микрохроматика — это область музыкальной теории и практики, связанная с использованием интервалов, меньших, чем полутон, который принят в стандартной западной двенадцатиступенной темперации. Но развитие микрохроматических строев ставит перед музыкальной теорией и ряд фундаментальных проблем, связанных с выбором базового принципа деления октавы (или другого интервала, выбранного в качестве «периода»), организацией лада и функциональной гармонии, отсутствия стандартизированной терминологии, а также существовании психоакустических барьеров при восприятии слушателем, воспитанным на двенадцатиступенном строе. Теоретические и экспериментальные исследования авторов [1-4] частично позволяют преодолевать эти трудности, сохраняя единую систему взаимодействия функций и тональной логики для классики и микрохроматики.

Еще одной из важных проблем при переходе к новым строям, основанным на обертоновых системах, становится их «неравномерность» в распределении звуков (нот) внутри условной октавы. Следствием этого является отсутствие свободного модулирования между тональностями при использовании инструментов с фиксированным строем. Переход к темперированным микрохроматическим строям так же как и переход в XVIII веке от натурального строя к 12-ступенному равномерно-темперированному позволит свободно переходить из одной тональности в другую и использовать клавишные инструменты во всех тональностях без перенастройки. Авторы [4], рассчитывая частоты системы звуков, темперируют полученные ими системы произвольным образом, не задавая изначально «погрешность» своей аппроксимации, что должно бы быть определяющим фактором при создании микрохроматических строев, построенных на обертонах, и стремящихся сохранить естественную консонантность интервалов, возникающих в таком строе. В данном докладе будет дан алгоритм нахождения оптимального количества ступеней равномерно-темперированного обертонового

микрохроматического строя, исходя из заданной максимальной величины погрешности частоты для энгармонически равных звуков.

1 Алгоритм

Проиллюстрируем алгоритм нахождения минимального количества ступеней звукоряда равномерно-темперированного строя (РТС), близкого к звукоряду натурального строя (НС) с произвольным пределом факторизации на примере пифагорейского (октавно-квинтового) строя (НС-3). Все члены звукоряда пифагорейского строя от частоты ν_0 порождаются интервалами чистой октавы ($2\nu_0$, первый обертон) и дуодецимы – квинты через октаву ($3\nu_0$, второй обертон), поэтому для произвольного звука ряда можно записать

$$\nu_{nm} = \nu_0 \cdot 2^n \cdot 3^m, \qquad (1)$$

где n, $m \in Z$ – количество октавных и квинтовых шагов. На рис. 1 показана получаемая последовательность нот, сведенных в пределы одной октавы (2:1), начиная от *C* («*до*»). Для удобства высота каждой ноты выражена в центах

$$c = 1200 \cdot \log_2\left(\frac{\nu}{\nu_0}\right). \qquad (2)$$

Записывая последовательность (1) с учетом одного октавного переноса (n = -1 при m = 1, 2,…; n = 1 при m = -1, -2,…) и учитывая (2), получаем обычную арифметическую прогрессию – последовательный ряд квинт, отложенных от *C* в обе стороны:

$$a_m = 1200 \cdot \log_2\left(\frac{\nu_{nm}}{\nu_0}\right) = 1200 \cdot \left(n + m\log_2 3\right)$$

или

$$a_m = 702m. \qquad (3)$$

Как известно, любой натуральный (чистый) строй, использующий интервалы, построенные на основе обертонов, является незамкнутым. Для пифагорейского строя величина такой «ошибки» – пифагорова комма Δ_π = 23.46 с (ноты *си диез His* и *ре дубль-бемоль Deses* на рис. 1 отличаются от *до* на Δ_π).

Для аппроксимации любого НС необходимо изначально задать величину максимально допустимой величины расходимости звукоряда, т.е. коммы Δ. Зная наперед, что для 12-ступенного пифагорейского строя $\Delta = \Delta_\pi$, положим Δ = 25 с. Для нахождения членов ряда, отличающихся от какой-либо ноты *C* на интервал не превышающий заданной коммы, необходимо решить неравенство

$$\left|a_m - 1200t\right| \le \Delta, \qquad (4)$$

где t – количество полных октав в интервале a_m. Неравенство (4) является диофантовым и будет иметь решения при условии деления Δ на НОД Δ_0 коэффициентов неравенства без

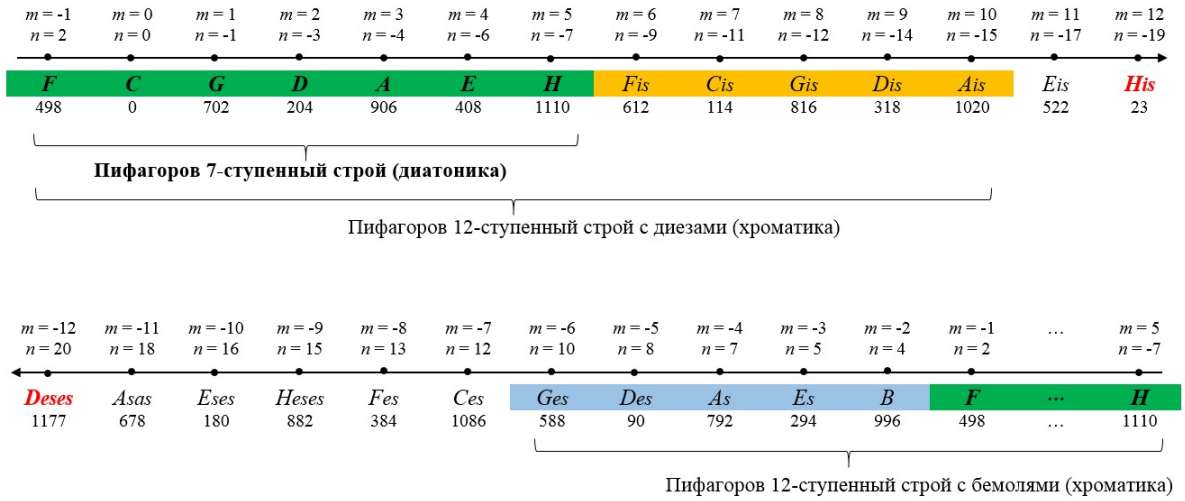


Рис. 1. Звукоряды пифагорейского строя. Над нотой указано количество октавных *n* и квинтовых *m* шагов последовательности (1) при сведении всех звуков в пределы одной октавы (2:1); под нотой в центах указана величина интервала от *C* до этой ноты.

остатка. Если данное условие не выполняется, то необходимо взять целую часть отношения

$$\left[\frac{\Delta}{\Delta_0}\right] = N\,.$$

В нашем случае $\Delta_0 = \text{НОД}(702,1200) = 6$ и при $\Delta = 25$ с неравенство не имеет решений в целых числах, но они будут при всех $\Delta_i = \Delta_0 i$, где $i = 1, 2,\ldots, N$, $N = 4$. Поэтому, для нахождения ближайшего к началу последовательности (3) члена ряда, удовлетворяющего условию (4), необходимо решить совокупность из $2N$ уравнений

$$\left|a_m - 1200t\right| = \Delta_i \qquad (5)$$

и выбрать минимальное положительное значение *m*.

Для рассматриваемого нами случая условие (5) будет иметь следующие решения

$$m = 200q + 53,\ t = 117q + 31\,(\Delta = 6);\quad m = 200q + 159,\ t = 117q + 93\,(\Delta = 18);$$
$$m = 200q + 147,\ t = 117q + 86\,(\Delta = -6);\quad m = 200q + 41,\ t = 117q + 24\,(\Delta = -18);$$
$$m = 200q + 106,\ t = 117q + 62\,(\Delta = 12);\quad m = 200q + 12,\ t = 117q + 7,\,(\Delta = 24);$$
$$m = 200q + 94,\ t = 117q + 55\,(\Delta = -12);\quad m = 200q + 188,\ t = 117q + 110,\,(\Delta = -24),$$

где $q \in Z$. Видно, что при $q = 0$ решения принимают минимальные положительные значения и ближайшее к началу последовательности (3) будет $m = 12$, как и следовало ожидать (*His* и *Deses* на рис. 1). Отметим, что условие (4) будет иметь решение даже в случае $\Delta = 0$, что соответствует точному попаданию в ноту и должно было бы противоречить незамкнутости звукоряда для любого натурального строя. Но записанный нами шаг прогрессии (3) в 702 с для чистой квинты является округленным $1200(1 - \log_2 3) = 701.955\ldots$, поэтому уже изначально несет в себе небольшую комму.

Для октавно-квинто-терцового строя или натурального строя факторизации 5 (НС-3,5) все члены звукоряда порождаются, как и в пифагорейском строе, интервалами чистой октавы и дуодецимы, а также терции через две октавы ($5\nu_0$), поэтому для произвольного звука такого ряда можно записать

$$\nu_{nmk} = \nu_0 \cdot 2^n \cdot 3^m \cdot 5^k,$$

где $n, m, k \in Z$ – количество октавных, квинтовых и терцовых шагов. На рис. 2 показана сетка тонов строя НС-3,5 и образуемые в нем звукоряды. Вдоль горизонтальной оси сетки откладываются чистые квинты (702 с), вдоль вертикальной – большие терции (386 с). Аналогично (3) можно записать

$$a_{mk} = 702m + 386k.$$

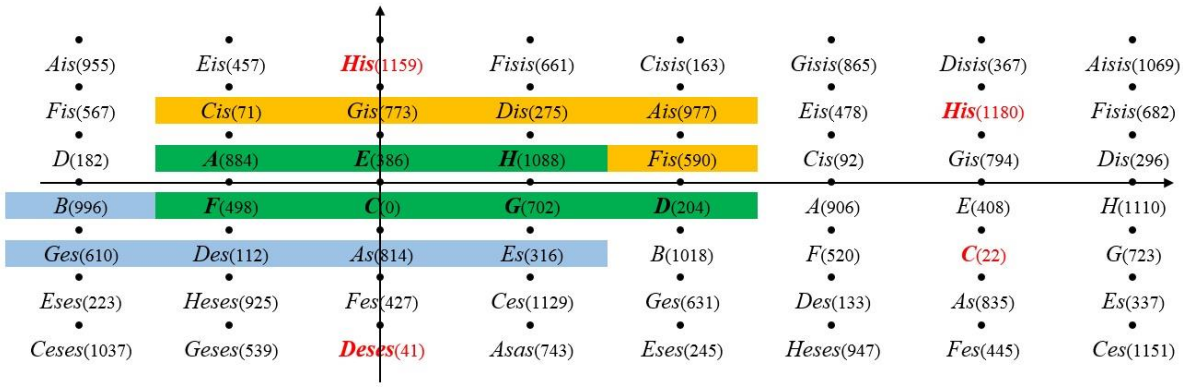


Рис. 2. Сетка тонов строя НС-3,5 (октавно-квинто-терцовый строй). Под каждой нотой в центах указана величина интервала от *C* до этой ноты. Зеленым цветом выделены семь ступеней диатонического ряда, желтым / синим – дополнительные пять диезных / бемольных ступеней, возникающих в хроматическом ряду. Красным цветом выделены энгармонические звуки.

На рис. 2 красным цветом выделены звуки, энгармонически равные ноте *C*. Видно, что при движении по большим терциям (терцовый круг) вдоль вертикальной оси, в данной системе, аналогично пифагоровой комме, будет возникать своя «ошибка» несходимости звукоряда – малая диеса $\Delta_d = 41.06$ с (*His* и *Deses* отличаются от *C* на Δ_d).

Зададим величину максимально допустимой погрешности $\Delta = 42$ с и найдем звуки, отличающиеся от *C* на интервал не превышающий заданной коммы, решив неравенство (4). Так как $\Delta_0 = \text{НОД}(702, 386, 1200) = 2$, поэтому при $\Delta = 42$ с неравенство будет иметь решения в целых числах. Для каждого $\Delta_i = \Delta_0 i$, где $i = 1, 2, \ldots, N$, а $N = 21$, необходимо решить уравнение

$$|a_{mk} - 1200t| = \Delta_i. \qquad (6)$$

Для определения оптимальной шкалы равномерной темперации, аппроксимирующей данный НС, необходимо найти две ближайшие к началу координат точки с координатами (*m*, *k*) (таблица 1, выделены зеленым цветом), которые будут концами векторов с началом в

(0, 0). Численное значение площади параллелограмма, построенного на этих векторах, даст количество ступеней искомого темперированного звукоряда [4]:

$$S = |\mathbf{a} \times \mathbf{b}| = |x_a y_b - x_b y_a| = |8 \cdot 2 - 4 \cdot 1| = 12.$$

Как и следовало ожидать, натуральный строй НС-3,5 хорошо аппроксимируется 12-ступенной шкалой, что и используется в музыке до сегодняшних дней. Стоит понимать, что при увеличении величины заданной коммы, количество ступеней аппроксимирующего РТС будет уменьшаться и наоборот.

Таблица 1

Минимальные положительные значения координат *m* и *k* при заданной Δ

Δ	**2**	**-2**	**4**	**-4**	**…**	**18**	**-18**	**20**	**-20**	**22**	**18**	**…**	**40**	**-40**	**42**	**-42**
m	8	163	16	155	…	159	41	167	4	175	159	…	134	37	171	29
k	1	2	2	1	…	0	0	1	2	2	0	…	2	1	0	0

Заключение

Таким образом, в докладе разработан алгоритм оптимальной темперации обертоновых микрохроматических строев (натуральных строев с произвольным пределом факторизации) с заданной наперед максимально допустимой погрешностью частоты для энгармонически равных звуков. Приведенный алгоритм позволяет находить минимальное количество ступеней равномерно-темперированного звукоряда, отталкиваясь от физиологических аспектов восприятия музыкальных интервалов слушателем. Известно, что слух человека способен отличить два звука с разницей всего лишь несколько центов на частоте 1 кГц. Задавая величину коммы, равной «погрешности» человеческого уха, можно переходить к новым микрохроматическим строям, сохраняя при этом консонантность интервалов и возможности свободного перехода из одной тональности в другую (модуляция).

Список литературы

1. *Олейников Р.В.* Построение музыкальных систем. М.: ЛЕНАНД, 2020 – 168 с.
2. Микрохроматические строи и тональности. Часть 1. Классика: видеолекция 00.41.55 (время воспроизведения). URL: https://youtu.be/Brs9J7boPQw?si=3EAURIt_DPs5eBDO (дата обращения: 30.03.2026). Доступно на: https://youtube.com/@Science4Music
3. Микрохроматические строи и тональности. Часть 2. Микрохроматика: видеолекция 00.47.23 (время воспроизведения). URL: https://youtu.be/seqasXk7ahs?si=EZvh3pH965fP8k4w (дата обращения: 30.03.2026). Доступно на: https://youtube.com/@Science4Music
4. Темперация микрохроматики. Топология гармонии: видеолекция 01.42.49 (время воспроизведения). URL: https://youtu.be/UB-0ti31Hqo?si=oUUWzjptx0NGTcaq (дата обращения: 30.03.2026). Доступно на: https://youtube.com/@Science4Music

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39757

К вопросу исторического развития древнерусских певческих стилей в контексте типологии отечественного храмового зодчества

Давиденкова-Хмара Е.Ш.
[1)] Санкт-Петербургская государственная консерватория им.Н.А.Римского-Корсакова кафедры оркестровки и общего курса композиции; кафедра древнерусского певческого искусства
[2)]Союз композиторов Санкт-Петербурга
Тел.: (+79062778283);
E-mail: k_davidenkova@mail.ru

В докладе рассматривается сложный нелинейный процесс формирования профессионального певческого искусства в русской православной церкви в контексте отечественной музыкальной медиевистики и музыкальной акустики. Исследование особенностей древнерусских певческих стилей разных исторических периодов, от эпохи заимствования византийской системы пения в X веке до развитого полифонического многоголосия XVI века, показывает, что этот процесс взаимозависим от структуры богослужения, которое претерпело значительные трансформации и от характеристик звукового пространства, в котором проводились церковные службы. Типология основных видов храмового зодчества в России позволяет увидеть ряд закономерностей в развитии древнерусского певческого искусства, а также понять специфику акустического звучания монодического мужского хорового пения, в условиях православного храма, в котором особенно раскрываются его художественные и семантические ресурсы.

Изучение вопросов взаимовлияния храмовой акустики и певческих стилей может быть практически полезно как для современных певцов, исполняющих древнерусскую церковную музыку, так и для ученых, интересующихся историей отдельных храмов и монастырей, так как как именно звуковая, акустическая сторона исследования, обычно оказывается в тени остальных задач и целей.

Ключевые слова: храмовое зодчество, древнерусское певческое искусство, музыкальная акустика

On the historical development of old russian singing styles in the context of the typology of domestic church architecture

DAVIDENKOVA-KHMARA Ekaterina Shandorovna
1) N.A. Rimsky-Korsakov St. Petersburg State Conservatory, Department of Orchestration and General Composition Course; Department of Old Russian Singing Art
2)Union of Composers of St. Petersburg
Phone: (+79062778283);
E-mail: k_davidenkova@mail.ru

The report examines the complex nonlinear process of the formation of professional singing art in the Russian Orthodox Church in the context of Russian musical medieval studies and musical acoustics. A study of the features of Old Russian singing styles from different historical periods, from the adoption of the Byzantine singing system in the 10th century to the developed polyphonic singing of the 16th century, shows that this process is interdependent with the structure of the liturgy, which

has undergone significant transformations, and with the characteristics of the sound space in which the singing takes place. in which church services were held. The typology of the main types of church architecture in Russia allows us to see a number of patterns in the development of Old Russian singing art, as well as to understand the specifics of the acoustic sound of the monophonic male choir singing in the context of an Orthodox church, where its artistic and semantic resources are particularly revealed.

Studying the interplay between temple acoustics and singing styles can be practically useful for both contemporary singers who perform ancient Russian church music and scholars interested in the history of individual churches and monasteries, as the sound and acoustic aspects of the study often go unnoticed.

Keywords: temple architecture, ancient Russian singing art, musical acoustics

Введение

Лаборатория русской музыкальной медиевистики имени М. В. Бражникова Санкт-Петербургской государственной консерватории с 2019 года до настоящего времени проводит исследование музыкального наследия Соловецкого Спасо-Преображенского монастыря, обладающего обширным корпусом нотированных рукописей XV–XVIII вв. В рамках научной деятельности лаборатории в 2021 году был инициирован научно-исследовательский проект, призванный рассмотреть разные аспекты уникального звучащего пространства соловецкого Спасо-Преображенского собора, в том числе возможные взаимосвязи между аудиальным и пространственным опытом его восприятия, в контексте уникального архитектурного устройства храма. Целью данного проекта стало комплексное исследование пространства собора с учетом специфики комплекса акустических характеристик, обусловленных конструктивными особенностями храма, в контексте истории певческой традиции обители XVI – начала XVIII вв. Особое внимание при этом было уделено уникальной соловецкой богослужебной практике и художественной организации музыкально-поэтических текстов в социокультурном контексте Русского Поморья.

Спасо-Преображенский собор Соловецкого монастыря представляет собой выдающийся историко-культурный феномен. Его возведение в 1558–1566 гг. стало событием необыкновенным, не имеющим аналогов в истории отечественного храмового зодчества. По-видимому, в архитектурно-художественном решении храма изначально присутствовала явная символическая составляющая, оказавшая влияние на визуальный и пространственный образ главного собора обители с его высокими белыми стенами, возвышающимися над горизонталью Белого моря и низкими берегами бухты Благополучия, символизируя перспективу от «дольнего» к «горнему». Эта же «духовная вертикаль» обнаруживается в интерьере храма, его световом и аудиальном пространстве.

Символическая образность наравне с художественным воздействием монументального собора в его материальности, оказывались тем неизменным контекстом, в котором звучали песнопения на протяжении сотен лет, что не могло не сформировать своеобразную слуховую память богослужебного обихода, звукоидеал акустической реализиции монастырской службы.

В рамках проекта перед исследователями стояло ряд задач, среди которых можно выделить:

1) исследование акустики храма с использованием современных технических средств с целью реконструкции его «звукового ландшафта»;

2) исследование рукописных источников, фиксирующих особенности певческой практики клироса храма (состав хора, расстановка ликов во время богослужения, выбор одноголосных / многоголосных певческих произведений для торжественных моментов службы, драматургия чинопоследования в музыкальном аспекте и т. д.), а также художественных особенностей песнопений в честь Преображения Господня и соловецких святых по нотированным рукописям из Соловецкого собрания РНБ XVI–XVIII вв. с целью

выявления в них тех приемов музыкальной выразительности, которые могли актуализироваться в звуковом пространстве Преображенского собора, в том числе за счет особенностей его акустики (использование в богослужебной практике монастыря разных певческих стилей — знаменного, большого, путевого, строчного, партесных гармонизаций; логико-семантические акценты в художественной структуре музыкально-поэтических текстов, образная насыщенность и элементы интермедиальности и т. д);

3) исследование сформировавшихся в соловецкой богословской культуре трактовок художественного и сакрального представлений о Преображенском соборе и его пространстве.

В центре рассмотрения исследователей было рассмотрение процессов взаимодействия материального, осязаемого физического пространства, а также символического толкования с художественными формами визуального и аудиального искусства в рамках традиционного монастырского богослужения, которое реконструируется на основании исторических источников.

Для исследования из соловецких музыкальных рукописей XVII – начала XVIII вв. был расшифрован ряд песнопений с крюковой и квадратной нотации из служб литургического календаря, значимых для соловецкой богослужебной традиции, разных певческих стилей (знаменного, большого, путевого, партесных гармонизаций знаменного роспева[1]).

1.	Стихира 1 на хвалитех Преображению **«Прежде честнаго креста»,** глас 4. Знаменный роспев. РНБ, Солов. 690/765, Сборник певческий, конец XVII в. (ниж. пагинация л. 99 об.–100).	«Ин роспев». Расшифровка С. Никольской.
2.	Стихира 4 на «Господи, воззвах» великой вечерни Преображению **«На горе высоце»,** глас 4. Знаменный роспев. РНБ, Солов. 691/790, Сборник певческий, конец XVII в., л. 86–86 об. Киевская квадратная нота.	Расшифровка С. Никольской
3.	«**С нами Бог»,** знаменный роспев (антифонное пение). РНБ, Солов. 621/663, Сборник певческий, л. 7–8 об.	«Ин роспев». Расшифровка С. Никольской
4.	Стихира **«Приидите взыдем»,** глас 5. Знаменный роспев (перезапись). РНБ, Солов. 621/663, Праздники, 1690 г.	Расшифровка С. Никольской
5.	Стихира на литии **«Приидите празднолюбных»**, четверогласник. Знаменный роспев. РНБ, Солов. 277/282, Сборник певческий, 70-е гг. XVII в., л. 493 об.	«Ин роспев». Расшифровка С. Никольской
6.	Задостойник Вознесению **«Тя паче ума**». Путь соловецкий. РНБ, Солов. 690/773, Сборник певческий, 1676–1682 гг., л. 403 об.–404.	«Ин роспев». Расшифровка Т. Швец
7.	Стихира-славник на «Господи, воззвах» великой вечерни Преображению **«Прообразуя воскресение»**, глас 6. Путевой	Игорь Середа. Расшифровка А. Кручининой

[1] Знаменный распев - основной вид богослужебного пения Древней Руси. Название получил от невменных знаков – «знамён», использовавшихся для его записи. Источником для знаменной нотации послужила палеовизантийская (т. н. куаленская); из византийской литургической практики был заимствован и принцип организации текстов, напевов, интонационных формул – система осмогласия. В процессе развития знаменного распева возникло несколько его разновидностей. Малый знаменный распев сохранил силлабическое произнесение текста, распространённое в богослужебном пении с 11 в. Большой знаменный распев мелизматического типа возник в 16 в. Большой знаменный распев отличают широкая внутрислоговая распевность, свободная изменчивость мелодического рисунка (чередование поступенного движения и скачков). Знаменный распев послужил источником путевого распева и демественного распева. Знаменный распев использовался в многоголосном строчном пении.

	роспев. РНБ, Солов. 277/280, Сборник певческий, 70-е гг. XVII в., л. 387 об.–388.	
8.	Стихира по 50-м псалме свт. Николаю **«Наследниче Божий»,** глас 6. Пространный роспев (большой?). РНБ, Солов. 1192/1304, Трезвоны и каноны нотированные, 1670-е гг., л. 33–33 об., 69–69 об.	«Ин роспев». Расшифровка С. Никольской
9.	**«Достойно есть»**, постоянное многоголосие. РНБ, Солов. 619/654, Сборник певческий, XVIII в. (верх. пагинация: л. 200–201 об; ниж. пагинация л. 202–203 об.).	«Ин роспев». Расшифровка С. Никольской

Одним из ключевых вопросов всего исследования стала проблема звучания в Преображенском соборе с его своеобразной акустикой (неравномерной и очень долгой реверберацией, яркими резонансами, совпадающими с зоной певческих формант), произведений не только знаменного роспева, доминировавшего в литургическом обиходе Соловецкого монастыря в XV–XVI вв., но и других певческих стилей, которые стали фиксироваться в соловецких музыкальных рукописях со второй половины XVI века. Главным открытием полевого исследования стал не только уникальный аудиальный опыт восприятия древнерусских роспевов в аутентичном пространстве, но и очевидность того факта, что в литургическом пространстве многие элементы подвергались дополнительной семиотизации.

Приведем в качестве примера всего лишь одно, особо значимое песнопение престольному празднику монастыря – Преображению Господню – так называемого путевого роспева, которое удалось расшифровать Альбине Никандровне Кручининой по рукописи Соловецкого собрания РНБ, № 277/280 70-х гг. XVII века. Это стихира-славник на «Господи, воззвах» великой вечерни с инципитом «Прообразуя воскресение Свое». Данное песнопение в соловецких уставах XVII века предписывалось исполнять не знаменным, а именно путевым роспевом. Можно сказать, что в этом случае речь идет не о нейтральной, традиционной звуковой среде соловецкого богослужения, а о неординарном элементе «звукового ландшафта».

Путевая версия роспева впервые фиксируется в соловецких, кирилло-белозерских и троицких рукописях, начиная с 60-х гг. XVI века, т. е. в период, максимально близкий возведению Преображенского собора, построенного по инициативе свт. Филиппа (Колычева) в 1558–1566 гг. Первые песнопения одноголосного путевого роспева создаются с конца XV века, постепенно все больше роспев распространяется именно в монашеской среде и становится неотъемлемой частью монастырского богослужения. Соловки также не стали исключением из этой тенденции. Можно с уверенностью утверждать, что в соловецком богослужении путевой роспев использовался в соответствии с определенным художественными целями, определяемыми функцией, иерархией значимости, семантикой текста.

Наиболее характерным в контексте особой звуковой характеристики роспева в структуре чинопоследования можно назвать ярко выраженную замедленность движения. В начальной и последующих строках она проявляется в преобладании долгих длительностей. Плавное мелодическое развитие раскрывается преимущественно в низком и среднем регистре в диапазоне кварты создает протяженные музыкальные фразы, организующие связный музыкальный текст. Среди традиционных приемов, характерных для путевого роспева, можно назвать:

1) синкопированный ритм, придающий мелодическому движению дополнительный импульс, энергию не только аудиального, но и смыслового акцента.

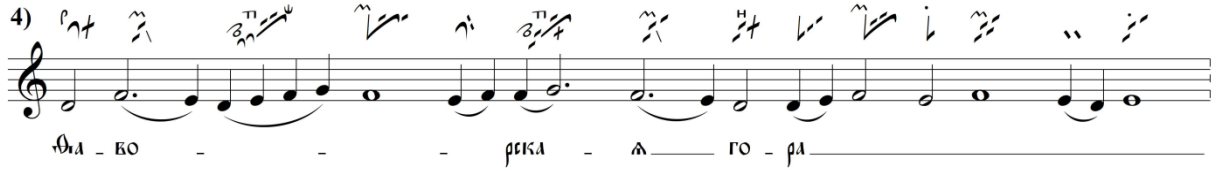
2) локальные зоны «беглого» движения кратких длительностей, создающие контраст окружающему фону более медленного мелодического движения, на словах «Фаворская гора», «светом», «долу», «славы».

3) дополнительная вокализация внутри отдельных лексем («Петра», «Фавор», «поят», «зрака», «страхом», «трепетом» и др.).

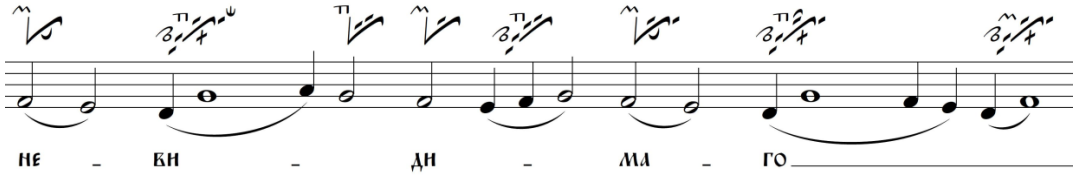
4) редкие выходы в светлое согласие, создающие свое особое акустическое пространство, в котором важную роль играет и регистровый контраст, и устремленность квартового хода, который как будто бы акцентуализирует энергию подъема, просветления, вознесения.

Об этих фрагментах стоит сказать отдельно несколько слов.

Первое восхождение в «светлое» согласие выделяет лексему **«Фаворская»:**



Более интенсивный и яркий «всплеск» в высокой тесситуре выделяет слово **«невидимаго»,**



И, наконец, в заключительном разделе музыкально-поэтического текста, где находится безусловная кульминация песнопения – особо длительный пространный роспев синтагмы **«(земля видящи) на себе**», свидетельствующий о концептуальной значимости образа Богоявления — сияния Божественной славы на верху горы.

Как же откликается акустическое пространство храма на эти важные семантические зоны звучания роспева?

Одной из сторон существования песнопения в звуковом ландшафте монастыря является неодномерная структура пространства, которое ограничивает его звучание и включает в определенный контекст восприятия и осмысления, или, иначе говоря, — наличие субландшафтов. Субландшафты – это и реальные пространства, изолированные друг от дркуга, и некоторые конвенции сознания, с ними связанные. В нашем случае – это собственно храмовый интерьер, в котором звучит особым образом роспетое слово, выполняя литургические функции. Литургийность во многом обусловливает опыт восприятия песнопения, включая как главную его составляющую – распетый текст, так и такие неочевидные его компоненты как голос сам по себе, реверберация, сопутствующие шумы, хорошо известные любому участнику богослужения (чтение, шуршание, шаги, скрип двери, вздохи, шепот, позванивание кадила и т.п.). При этом звуковой ландшафт вне стен храма в значительной степени иной. Это масса природных звуков и антропогенные звуки, в том числе пение другого типа – народная традиция, которая существует в нашем понимании как совершенно иная реальность. Тем не менее, эти два звуковых субландшафта существуют одномоментно в сознании носителя традиции.

Одной из явных звуковых особенностей собора является чрезвычайно длительная реверберация, меняющаяся в разных акустических зонах храма, к которой певчие должны были адаптироваться, выбирая темп и регистровые характеристики, максимально естественные для восприятия в данном звуковом пространстве. В качестве гипотезы можно предположить, что сложившиеся исторические традиции исполнения песнопений в Спасо-Преображенском соборе, с учетом слухового анализа самих певчих и их слушателей, динамического и тембрового освоения возможностей акустической среды, привели к вырабатыванию определенного комплекса исполнительских приемов звучания в звуковом пространстве собора, что оказало определенное влияние на формирование соловецкой певческой школы.

На основе анализа характеристик звучания в храме из основных слушательских позиций позиций (рядом со столпами, в притворе, за столпами, за столпами при условии звукопередачи со стороны клироса, с большой степенью дифракции сигнала) можно констатировать, что фактор разборчивости речи в соборе зависит от местоположения слушателя. Так, рядом с отражателями, такими как столпы и стены, разборчивость улучшается, за счет сложения прямого и отраженного сигнала, под куполом разборчивость падает по мере повышения частот. В соборе есть по крайней мере 6 «теневых зон» с очень низкой разборчивостью. И в дальнейшем, имея возможность сравнить параметры разборчивости при слуховой оценке непосредственно в первичном акустическом поле и в фонограмме, можно отметить следующий артефакт. Спектральная картина звучащих голосов, трансформируясь из-за характеристик АЧХ приемников (особенно общих микрофонов), приобретая большую звуковысотную дифференциацию, дополнительно теряет разборчивость, так как при этом происходит совпадение зон «сглаживания» в первичном поле акустики собора и в электроакустическом тракте. Возвращение разборчивости оказывается возможным благодаря спектральной коррекции, реконструкции параметров, максимально близких к заданным. Тем не менее, динамические и частотные доминанты при этом абсолютно четко и ясно сохраняют свои аудиальные и семантические свойства. Таким образом, можно говорить о том, что акустический «оттиск» звучания распева остается константным и легко считывается, несмотря на контекст исполнения и прослушивания.

Заключение

Музыкальными средствами путевого роспева выделен важнейшая тема Преображения – мотив «видения света», сопричастия «и нас грешных» Божественному свету, воссиявшему на горе Преображения. Роль этой музыкальной кульминации чрезвычайно важна. Пространство храма «откликается» на эти зоны просветления, за счет особенностей спектральных характеристик реверберационного поля и резонансов, подчеркивающий певчекие форманты мужского мододийного пения.

Стилистические особенности путевого роспева нельзя рассматривать только как исторический этап развития соловецкой певческой школы. Звук оказывается дополнительным семиотическим кодом, раскрывающим природу и значение исторически сложившихся церковных роспевов, исполненных в аутентичном певческом стиле, что становится понятно при восприятии живого звука в конкретном пространстве. Включение особых певческих стилей, таких как путевой роспев, в богослужение главного храма Соловецкого монастыря играло роль аудиальной и семантической доминанты, особого типа выделения литургического текста, приобретающего признаки звукового символа.

УДК: 787.61 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39758

ИССЛЕДОВАНИЯ КОНСОНАНСНЫХ СООТНОШЕНИЙ В АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ СТРУННЫХ МУЗЫКАЛЬНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ НА ПРИМЕРЕ ГИТАРЫ

А. Ф. Чунарев
г.Ижевск; E-mail: afchu11459@gmail.com

Представлен оригинальный авторский способ измерения амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) струнных музыкальных инструментов (патент РФ на изобретение №2416128). Выявлено, доминирующее влияние на тембр гитары первых мод, музыкальный интервал между которыми, как правило, равен или близок к октаве. Проведены исследования резонатора имеющего две акустические камеры, заявка РФ на изобретение №2026100898/20(001644) от 16.01.2026 года. Для оценки качества звучания инструментов предложен метод интерпретации частотного положения нижних мод, как систему, образующую музыкальные интервалы, а также метод статистического анализа амплитуд.
Ключевые слова: АЧХ резонатора, главные нижние моды, музыкальные интервалы.

RESEARCH OF CONSONANCE RELATIONSHIPS IN THE AMPLITUDE-FREQUENCY CHARACTERISTICS OF STRING MUSICAL INSTRUMENTS, USING THE EXAMPLE OF THE GUITAR

A. F. Chunarev,
Izhevsk, 426035 Russia; E-mail: afchu11459@gmail.com

A unique method for measuring the amplitude-frequency response (AFR) of stringed musical instruments is presented (Russian Federation Patent for Invention No. 2416128). The dominant influence on guitar timbre is revealed to be the primary modes, the musical interval between which is typically equal to or close to an octave. A resonator with two acoustic chambers was studied (Russian Federation Patent for Invention No. 2026100898/20(001644) dated January 16, 2026). To assess the sound quality of the instruments, a method for interpreting the frequency position of the lower modes as a system forming musical intervals, as well as a method for statistical analysis of the amplitudes, is proposed.
Keywords: resonator AFR, primary lower modes, musical intervals.

Введение

В настоящее время отсутствует общепринятая количественная характеристика, позволяющая объективно описывать акустические свойства струнных музыкальных инструментов, в частности тембр гитары. В практике музыкантов и экспертов для его описания используются качественные определения («тёплый», «яркий», «глубокий» и др.),

которые носят субъективный характер и зависят от индивидуальных особенностей слухового восприятия. Одной из ключевых характеристик тембра гитары является воздушный резонанс корпуса A_0, представляющий собой первую объёмную моду. Данный резонанс формирует нижнюю границу эффективного излучения звука и может рассматриваться как частота среза акустического фильтра резонатора: ниже этой частоты эффективность излучения резко снижается. Второй важной модой является основной изгибной резонанс деки T_1, при котором значительная часть её поверхности колеблется как единое целое, обеспечивая эффективное преобразование энергии колебаний струн в акустическое излучение. Характерной особенностью акустической архитектуры гитары является частотное соотношение между модами A_0 и T_1, которое, как правило, близко к двум, что соответствует музыкальному интервалу октавы [1]. Данное соотношение традиционно рассматривается как благоприятное с точки зрения акустики инструмента. Однако более детальный анализ показывает, что подобная «октавная архитектура» приводит к снижению разнообразия формируемых акустических структур, поскольку октава не создаёт новых спектральных компонентов, а дублирует существующие на другом частотном уровне. Дополнительной проблемой является низкая модальная плотность в диапазоне до 300–500 Гц, в котором сосредоточена основная энергия колебаний струн и расположено большинство извлекаемых на инструменте нот по основному тону. В типичной конструкции гитары в данном диапазоне эффективно работают лишь 2–3 моды, что может приводить к неравномерности амплитудно-частотной характеристики и образованию спектральных «провалов». Исторически конструкция гитары формировалась с учётом использования жильных струн с относительно низким натяжением, что позволяло применять более тонкие и гибкие деки. По акустике это выражалось в низких значениях A_0 и T_1 старинных инструментов, эффективным излучением низких частот. В современных инструментах использование струн высокого натяжения приводит к увеличению жёсткости конструкции, росту потерь энергии на внутреннее трение в материалах, смещению всей АЧХ в область более высоких частот. Это, в свою очередь, ухудшает условия формирования низкочастотных мод, требующих значительных амплитуд колебаний и больших площадей деформации. В связи с этим возникает задача разработки методов измерения и анализа акустических характеристик резонаторов, позволяющих не только фиксировать частотное положение мод, но и интерпретировать их взаимное расположение с точки зрения формирования акустически и музыкально значимых структур.

1. Способ экспериментального исследования

Предложен и запатентован «Способ измерения динамических характеристик струнных музыкальных инструментов и Устройство для его осуществления» (Патент РФ на изобретение №2416128).

Идея изобретения в без контактном электромагнитном возбуждении упругих колебаний деки, с последующим измерением акустического отклика резонатора (деки), и

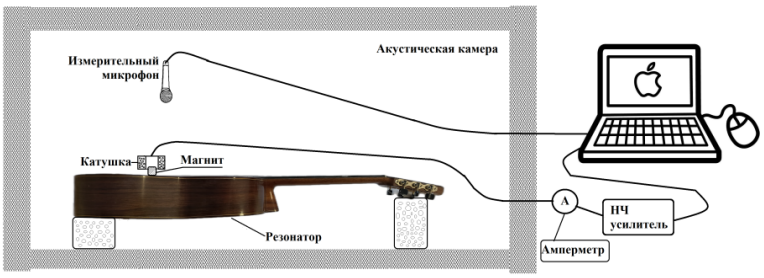


Рис. 1. Рабочее место для измерения акустических характеристик резонаторов.

обработкой результатов, в автоматическом режиме. Катушка не имеет механического контакта с декой, что позволяет полностью исключить паразитные отраженные волны от системы возбуждения, увеличение массы деки и ее демпфирование. При неизменных величинах магнитной индукции, количестве витков в катушке, токе, контролируемом амперметром, сила механических возмущений направленная на деку постоянна во всем исследуемом диапазоне частот. Программа, позволяет производить исследования от 20 до 5000 Гц, с заданным шагом частот от 1 Гц, по нотам, делать сравнительный анализ путем выведения на экран сразу нескольких характеристик, проводить измерения добротности резонансов, генерировать и анализировать импульсы заданной формы и длительности, производить статистический анализ амплитуд откликов с расчетом среднего значения, математической дисперсии, асимметрии, эксцесса и построением диаграмм распределения.

2. Объекты исследования

Для решения проблемы «октавной архитектуры», предложена конструкция резонатора, содержащая две акустические камеры, соединенные между собой четырьмя отверстиями, расположенными в разделяющей их промежуточной деке, суммарная площадь которых составляет 44% площади резонаторного отверстия деки (заявка РФ на изобретение №2026100898/20(001644 от 16.01.2026 года). По своей форме и размерам, конструкция соответствует форме резонатора классической гитары.

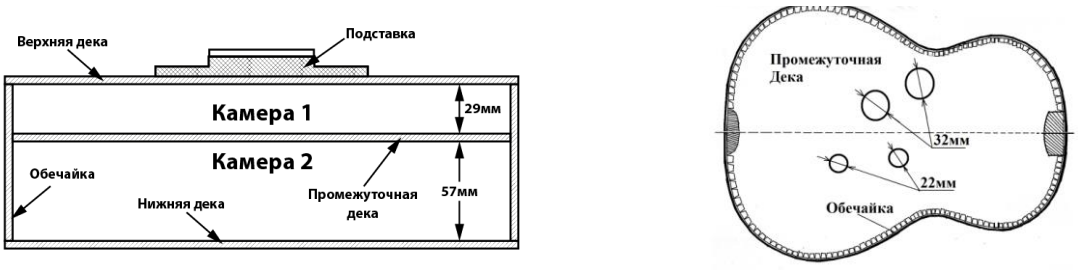


Рис. 2. Конструкция двухкамерного резонатора с промежуточной декой и системой отверстий в ней.

Второй объект исследования – стандартный, однокамерный резонатор классической гитары.

3. Экспериментальное исследование

Наибольший интерес для исследования представляет частотный диапазон до 600 Гц, поскольку именно в этой области сосредоточено более 90% извлекаемых на грифе гитары нот по их основному тону. По некоторым оценкам, на первые 4–6 мод данного диапазона

приходится до 80% всей излучаемой акустической энергии резонатора [1,2]. Основная энергия щипка струны также сосредоточена в основном тоне и первых гармониках, попадающих в диапазон первых мод [2]. На более высоких частотах (выше 7–8-й моды) колебания деки носят локальный характер: поверхность разбивается на множество участков, колеблющихся в противофазе, что приводит к снижению эффективности акустического излучения (эффект акустического короткого замыкания). Измерения АЧХ проводились в диапазоне 30–600 Гц с заданным шагом - 3 Гц. Полученные данные интерпретировались как совокупность мод резонатора с последующим анализом их музыкального положения и амплитудных характеристик.



Рис. 3. АЧХ стандартного однокамерного резонатора классической гитары.



Рис. 4. АЧХ двухкамерного резонатора с промежуточной декой.

Сравнительный анализ проводился по следующим параметрам: частотное положение основных мод, характер музыкальных интервалов между ними, плотность мод в исследуемом диапазоне, распределение амплитуд отклика. Для интерпретации результатов частотное расположение мод рассматривалось как система, формирующая музыкальные интервалы (октава, квинта, кварта, терции и др.). Количественная оценка осуществлялась путём подсчёта числа консонансных интервалов, трезвучий, в исследуемом диапазоне.

Результаты измерений показали, что двухкамерный резонатор характеризуется более низким значением воздушного резонанса A_0, увеличенной модальной плотностью в

критически важном диапазоне до 300 Гц, формированием дополнительных промежуточных мод, изменением «октавной архитектуры» с образованием сложных консонансных структур.

Таблица 1. Количественная оценка музыкальных структур резонаторов

	Частота Ao (Гц)	Аккорд (Мажор)	Октава	Квинта	Кварта	Большая/ Малая Терции	Ф 8/5	Всего структур
Стандартный резонатор	103	0	2	0	1	2	1	6
Двухкамерный резонатор	73	1	2	2	2	1	4	12

Для более точной и наглядной интерпретации модального покрытия, программно реализована функция статистического анализа амплитуд с расчетом среднего значения, математической дисперсии, асимметрии, эксцесса и построением диаграммы распределения.

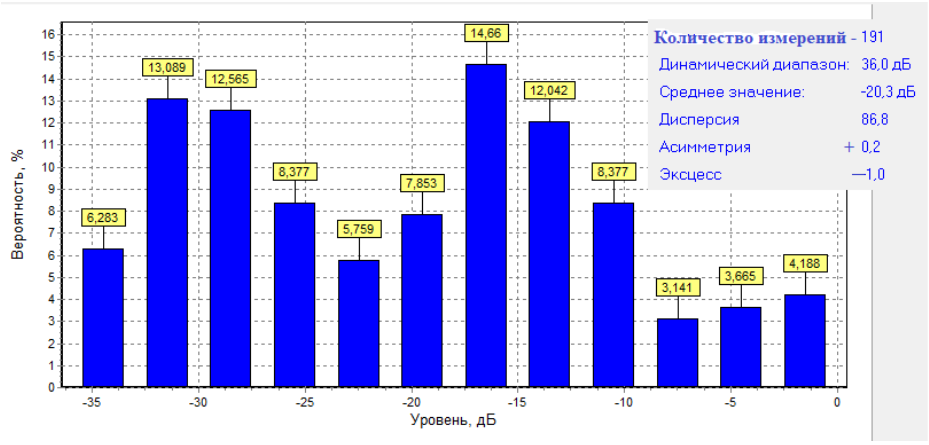


Рис. 5. Диаграмма статистики распределения амплитуд стандартного резонатора по их уровню.

Желтым цветом выделено количество измерений (в процентах) попавших в тот или иной амплитудный интервал (уровень).

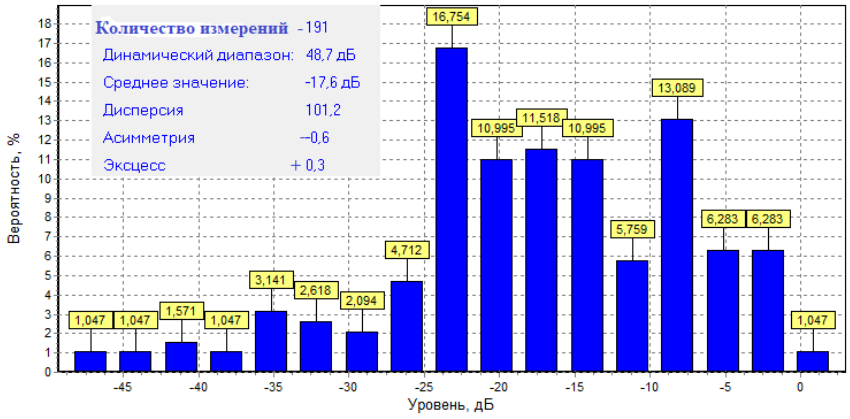


Рис. 6. Диаграмма статистики распределения амплитуд двухкамерного резонатора по их уровню.

Из представленных диаграмм хорошо видно, что двухкамерный резонатор,

показавший отрицательную асимметрию и положительный эксцесс, имеет гораздо лучшее модальное покрытие исследуемого спектра частот.

Заключение

В работе представлен способ измерения амплитудно-частотных характеристик резонаторов струнных музыкальных инструментов, основанный на бесконтактном электромагнитном возбуждении колебаний деки (патент РФ на изобретение №2416128). Проведён сравнительный анализ стандартного однокамерного резонатора и резонатора с двумя акустическими камерами. Показано, что модальная структура традиционного резонатора характеризуется низкой плотностью мод в критически важной низкочастотной области и преимущественно октавными соотношениями между основными модами. Установлено, что изменение конструкции резонатора позволяет существенно изменить распределение мод в спектре: увеличить их плотность, сформировать дополнительные промежуточные моды и получить более разнообразные интервалы между ними.

Предложен подход к интерпретации модальной структуры резонатора как системы, формирующей музыкальные интервалы, а также введён статистический критерий оценки акустических свойств инструмента, основанный на анализе распределения амплитуд отклика (коэффициенты асимметрии и эксцесса). Показано, что резонаторы, характеризующиеся отрицательной асимметрией и положительным эксцессом распределения амплитуд, обладают более равномерным модальным покрытием частотного диапазона и обеспечивают более плотный и насыщенный тембр.

Методы и результаты исследования могут быть использованы при проектировании и оптимизации конструкций струнных музыкальных инструментов, имеющих акустический резонатор.

Список литературы

1. *Richardson B. E.* The acoustical development of the guitar // Journal of the Catgut Acoustical Society. 1994. Vol. 2, No. 6. P. 1–10.

2. *Taylor J.* Tone Production on the Classical Guitar. — [London] : Musical New Services, 1978. — 80 p.

3. *Carleen Maley Hutchins,* «The Acoustics of Violin Plates» —*Scientific American*, Vol. 245, No. 4, pp. 170–186, October 1981

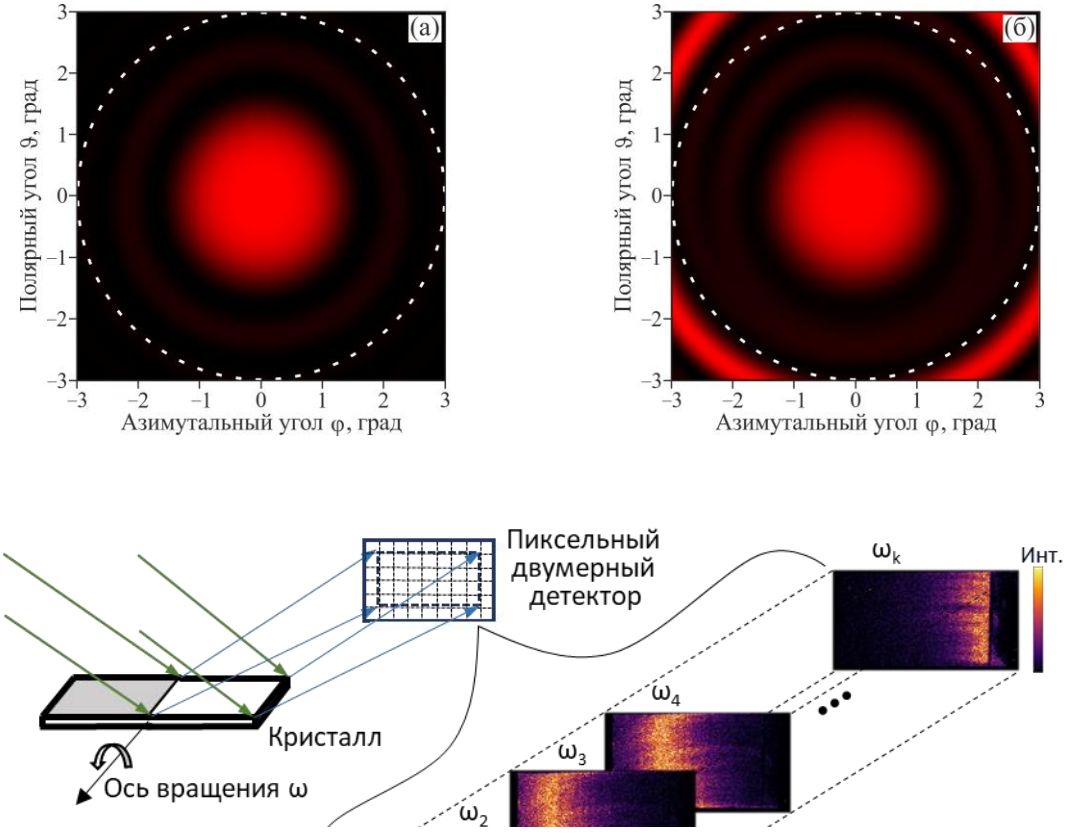
4. *Джеймс Вестбрук*. Век, создавший гитару. Издательский дом «Классика – XXI», 2012

5. *Кузнецов Л. А*. Акустика музыкальных инструментов: Справ. — М.: Легпромбытиздат, 1989. — 368 с.: ил.

6. *Алдошина И. А.* Основы психоакустики. Часть 3. Слуховой анализ консонансов и диссонансов // Звукорежиссер. — 1999. — № 3. — С. 54–57.

Назад к содержанию секции

СЕКЦИЯ АКУСТООПТИКА



назад к Содержанию

СОДЕРЖАНИЕ СЕКЦИИ АКУСТООПТИКА

1. ЛАЗЕРЫ И ЗВУК
Егерев С.В.....872

2. ФОРМИРОВАНИЕ ФОТОРЕФРАКТИВНОЙ РЕШЁТКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТОЯЧИХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН: ОДНОПРИМЕСНАЯ МОДЕЛЬ И ОЦЕНКИ ДЛЯ LiNbO3: Fe
Фахртдинов Р.Р., Шарафутдинов А.У. 873

3. ИССЛЕДОВАНИЕ СОГЛАСОВАНИЯ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МНОГОЭЛЕМЕНТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ФИЛЬТРОВОГО ТИПА ДЛЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ АКУСТООПТИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКИ БРЭГГА С ПЕРЕДАЮЩЕЙ СВЧ ЛИНИЕЙ
Вердиян М.Б., Заварин С.В., Кайгородова И.Г., Никишин Е.Л., Павлова М.В. 881

4. ИЗМЕНЕНИЕ ФАЗЫ ОПТИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ, УПРАВЛЯЕМОЕ ЧАСТОТОЙ ЗВУКА
Котов В.М., Аверин С.В., Карачевцева М.В. 887

5. ЛАЗЕРНЫЕ РЕКОНФИГУРИРУЕМЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЛОВУШКИ НА ОСНОВЕ АКУСТООПТИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ЧАСТОТ
Молчанов В.Я., Чижиков А.И., Юшков К.Б.....893

6. РАСПРОСТРАНЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В ОРИЕНТИРОВАННЫХ АКУСТООПТИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛАХ И НОВОЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ УСТРОЙСТВ
Поликарпова Н.В. 898

7. АКУСТООПТИЧЕСКИЕ ЯЧЕЙКИ НА ДВУОСНЫХ КРИСТАЛЛАХ В СИСТЕМАХ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ДВУХЦВЕТНЫХ СВЕТОВЫХ ПОЛЕЙ
Купрейчик М.И., Манцевич С.Н., Балакший В.И.....906

8. ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НА СТРУКТУРУ АКУСТИЧЕСКОГО ПУЧКА В АКУСТООПТИЧЕСКОМ КРИСТАЛЛЕ
Манцевич С.Н.....912

9. НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ АКУСТООПТИКИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
Элиович Я.А., Коржов В.А.,ТаргонскийА.В.,ПисаревскийЮ.В.,БлаговА.Э.....918

10. АКУСТООПТИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В СТРУКТУРАХ, СОДЕРЖАЩИХ СЛОИ
Князев Г.А. 925

11. ВИЗУАЛИЗАЦИЯ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЯХ АКУСТООПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ
Титов С.А., Давыдова Е.А. 931

12. АКУСТИЧЕСКИЕ И АКУСТООПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДВУОСНЫХ КРИСТАЛЛОВ НА ОСНОВЕ ЛИТИЯ
Хоркин В.С., Мильков М.Г., Купрейчик М.И., Манцевич С.Н.....934

13. ПРОЦЕССЫ В АКУСТООПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ, УПРАВЛЯЕМОЙ ДВУХЧАСТОТНЫМ СИГНАЛОМ
Дьяконов Е.А., Манцевич С.Н. 935

14. АКУСТООПТИЧЕСКОЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЕ УПРАВЛЕНИЕ КВАЗИБЕЗДИФРАКЦИОННЫМИ КОЛЬЦЕВЫМИ ПУЧКАМИ
Казаков В.И., Антонян А.Г., Маликов А.А., Шакин О.В., Кулак Г.В. 937

15. КВАЗИРАСПРЕДЕЛЁННАЯ ОПТОВОЛОКОННАЯ МИКРОФОННАЯ СИСТЕМА НА ОСНОВЕ ФАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО РЕФЛЕКТОМЕТРА
Гаврилин П.Г., Харасов Д.Р., Бенгальский Д.М., Почтарёв И.С., Трещиков В.Н. 942

16. КОЛЛИНЕАРНОЕ АКУСТООПТИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В СИСТЕМЕ С ОПТОЭЛЕКТРОННОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ
Балакший В.И., Манцевич С.Н., Купрейчик М.И.....947

17. ЦИТОЛОГИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КРОВИ РЫБ МЕТОДОМ ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ МИКРОСКОПИИ С АКУСТООПТИЧЕСКОЙ ПЕРЕСТРОЙКОЙ
Польщикова О.В., Мачихин А.С., Романова Н.Н.....948

18. ВАРИАНТ АКУСТООПТИЧЕСКОЙ МОДУЛЯЦИИ ПРОИЗВОЛЬНО ПОЛЯРИЗОВАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ АКСИАЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ В ПАРАТЕЛЛУРИТЕ
Подольский В.А., Резвов Ю.Г., Сивкова О.Д. 953

19. АКУСТООПТИЧЕСКИЕ СПЕКТРОМЕТРЫ И СПЕКТРАЛЬНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ИНДЕКСЫ
Пожар В.Е., Золотухина А.А. 959

DOI: 10.34756/GEOS.2026.17.39613

Лазеры и звук

Егерев С.В.

Институт научной информации по общественным наукам РАН, Москва

Тел.: +7(495)690-2459); E-mail: (segerev@gmail.com)

Взаимодействие лазерного излучения и акустических волн традиционно представляет почву для возникновения новых междисциплинарных направлений. Несмотря на то, что попытки упорядочить массив соответствующих публикаций и патентов по тому или иному критерию предпринимались еще в 1980-х годах (Л.М. Лямшев, УФН, 1987), бурный рост технологий за последние сорок лет требует пересмотра устоявшихся подходов.

В докладе предлагается актуальная систематизация лазерно-акустических пересечений, основанная на учете потоков энергии и информации. Выделены четыре фундаментальные категории: акустооптика (управление светом), оптоакустика (генерация звука), лазерная виброметрия (дистанционное измерение вибраций) и неупругое рассеяние (квантовое фотон-фононное взаимодействие).

Автор анализирует наиболее значимые тренды 2025–2026 годов — от спектральной фильтрации в обработке изображений и томографии до «лазерного слуха» в океанографии и бесконтактной биомеханики.

Обосновывается тезис об эволюции технологий как о переходе от изучения изолированных эффектов к созданию гибридных систем, где свет и звук становятся единым инструментом для исследования материи – стираются границы между оптической и акустической диагностикой. Таким образом, эволюция лазерно-акустических технологий рассматривается не только как прогресс приборостроения, но и как наглядный кейс для анализа методологии современного научного поиска.

Ключевые слова: акустооптика, оптоакустика, лазерная виброметрия, рассеяние Мандельштама-Бриллюэна, фотон-фононное взаимодействие, бесконтактная диагностика, лазерный ультразвук, спектральная фильтрация

УДК: 534.8, 537.874 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39614

Формирование фоторефрактивной решётки с использованием стоячих акустических волн: однопримесная модель и оценки для $LiNbO_3$:Fe

Р.Р. Фахртдинов[1,a], А.У. Шарафутдинов[2,b]

[1] *Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН. 142432, Московская обл., г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, д. 6.*

[2] *Институт физики твердого тела РАН. 142432, Московская обл., г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, д. 2.*

E-mail: [a]rash@iptm.ru, [b]shazat@issp.ac.ru

Аннотация: В работе представлено теоретическое описание методики формирования фоторефрактивной решётки (ФРР) в кристалле $LiNbO_3$:Fe с помощью стоячей объёмной акустической волны (сОАВ) при однородном непрерывном освещении. Данный метод открывает перспективу создания компактных, энергоэффективных и перестраиваемых фоторефрактивных фильтров для интегральной оптики. В основе описания перераспределения пространственного заряда лежит модель Кухтарева, адаптированная для учёта влияния сОАВ и подвижных ионов. Показано, что фотовозбуждённые электроны концентрируются в узлах сОАВ из-за нелинейности акустоэлектронного взаимодействия, а зависимость амплитуды модуляции показателя преломления от амплитуды сОАВ является квадратичной. В приближении малой амплитуды акустической волны вычислены квазистационарные поля пространственного заряда на стадии записи и после проявления ФРР, а также характерные времена этих процессов; расчёты сопоставлены с экспериментальными данными. Полученные теоретические оценки количественно объясняют ключевые параметры процесса (максимальную амплитуду модуляции Δn, время насыщения), однако указывают на необходимость уточнения модели для полного согласования с экспериментом.

Ключевые слова: ниобат лития, стоячая акустическая волна, фоторефрактивная решетка, сегнетоэлектрики, акустоэлектронное взаимодействие.

Photorefractive grating recording by standing acoustic waves: a single-impurity model and estimates for $LiNbO_3$:Fe

R.R. Fakhrtdinov[1,a], A.U. Sharafutdinov[2,b]

[1] *Institute of Microelectronics Technology and High Purity Materials, Russian Academy of Sciences. Chernogolovka 142432, Russia.*
[2] *Institute of Solid State Physics, Russian Academy of Sciences. Chernogolovka 142432, Russia.*
E-mail: [a]rash@iptm.ru, [b]shazat@issp.ac.ru

Abstract: The work presents a theoretical description of a method for forming a photorefractive grating (PRG) in a $LiNbO_3$:Fe crystal using a standing bulk acoustic wave (sBAW) under uniform continuous illumination. This method opens up the prospect of creating compact, energy-efficient and tunable photorefractive filters for integrated optics. The description of space charge redistribution is based on Kukhtarev's model adapted to account for the influence of the sBAW and mobile ions. It is shown that photoexcited electrons accumulate in the nodes of the sBAW due to the nonlinearity of the acoustoelectric interaction, and the dependence of the refractive index modulation amplitude on the sBAW amplitude is quadratic. In the small-amplitude acoustic wave approximation, the quasi-stationary space charge fields at the writing stage and after PRG development, as well as the characteristic times of these processes, are calculated; the calculations are compared with experimental data. The obtained theoretical estimates quantitatively explain the key parameters of the process (maximum modulation amplitude Δn, saturation time), but indicate the need to refine the model for full agreement with experiment.

Keywords: lithium niobate, standing acoustic wave, photorefractive grating, ferroelectrics, acoustoelectric interaction

PACS: 42.70.Ln, 43.35.Sx

Введение

Фоторефрактивные решётки (ФРР) находят широкое применение в голографии, волоконных брэгговских решётках и перестраиваемых фильтрах [1]. Традиционно их формируют с помощью интерференционной картины двух лазерных пучков. Альтернативный подход, предложенный в работах [2, 3], использует стоячую объёмную акустическую волну (cOAB) в кристалле $LiNbO_3$:Fe при равномерном непрерывном освещении. Этот метод теоретически может позволить создавать компактные, энергоэффективные и перестраиваемые фоторефрактивные фильтры для интегральной оптики, поскольку не требует сложной внешней оптической системы для формирования интерференционной картины. Несмотря на экспериментальное обнаружение эффекта, до настоящего времени отсутствовала количественная теоретическая модель, объясняющая его ключевые параметры — амплитуду модуляции показателя преломления, характерные времена записи и фиксации, а также зависимость этих величин от параметров акустической волны и материала. Цель работы — разработка такой модели на основе уравнений Кухтарева [4] с учётом акустического поля и подвижных ионов, а также сравнение полученных результатов с экспериментальными данными [2].

1 Описание физической модели акустофоторефрактивного эффекта

В экспериментальной схеме [2] (рис. 1) cOAB возбуждается вдоль оси Z кристалла $LiNbO_3$:Fe. Равномерное освещение вызывает фотовозбуждение электронов с донорных центров Fe^{2+} в зону проводимости (см. рис. 2). Обратный пьезоэффект создаёт переменное электрическое поле $E_a = E_0 \cos kz \sin \omega t$. Несмотря на нулевое среднее значение этого поля, из-за нелинейности уравнений, описывающих акустоэлектронное взаимодействие, возникает статическая модуляция электронной плотности с пространственным периодом, в два раза меньшим периода акустической волны. Как показано в работе, усреднённая по времени электронная плотность оказывается пониженной в пучностях стоячей волны. Это приводит к перераспределению заряда на ловушках Fe^{2+}/Fe^{3+} и формированию статического поля пространственного заряда E_{sc}. Благодаря линейному электрооптическому эффекту это поле модулирует показатель преломления кристалла, создавая ФРР.

Предшествующие описательные модели [7, 8] не позволяли количественно описать эффект; в данной работе впервые решена система уравнений переноса заряда в рамках однопримесного приближения с учётом подвижных ионов [5] (вероятнее всего, H^+), которые существенны при температурах выше 100°C и обеспечивают термическую фиксацию.

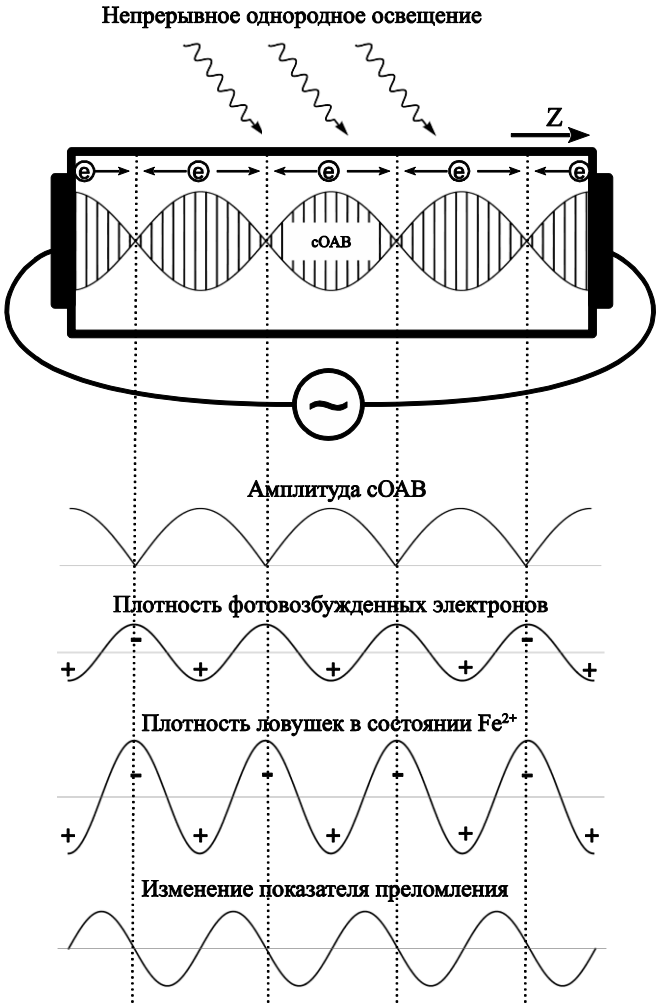


Рисунок 1. Схема формирования фоторефрактивной решётки с помощью стоячей объёмной акустической волны (cOAB). Сверху вниз: профиль амплитуды cOAB; распределение плотности фотовозбуждённых электронов (накопление в узлах); перераспределение занятых ловушек Fe^{2+}; возникающая модуляция показателя преломления кристалла.

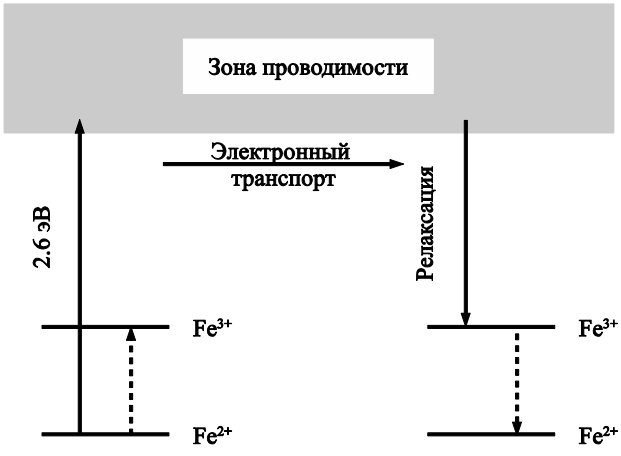


Рисунок 2. Модель электронного транспорта: фотовозбуждение, дрейф в поле E_a, рекомбинация.

2 Постановка задачи и основные уравнения

Модель базируется на системе уравнений, включающей уравнение непрерывности для электронов и ионов, уравнение Пуассона и кинетику заполнения ловушек:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial}{\partial t}\left(n_{\mathrm{e}}+N_2\right)=\mu_{\mathrm{e}}\nabla\left(n_{\mathrm{e}}E\right)+D_{\mathrm{e}}\Delta n_{\mathrm{e}}-\dfrac{\beta_{Ph}I}{h\nu e}\nabla N_2\ , \\ \dfrac{\partial}{\partial t}n_{\mathrm{i}}=-sgn\left(q_{\mathrm{i}}\right)\mu_{\mathrm{i}}\nabla\left(n_{\mathrm{i}}E\right)+D_{\mathrm{i}}\Delta n_{\mathrm{i}}\ , \\ \nabla E_{\mathrm{sc}}=-\dfrac{e}{\varepsilon\varepsilon_0}\left(n_{\mathrm{e}}+N_2-\dfrac{q_{\mathrm{i}}}{e}n_{\mathrm{i}}-N_{\mathrm{comp}}\right), \\ \dfrac{\partial}{\partial t}N_2=-\alpha N_2+\beta N_3 n_{\mathrm{e}} \end{cases} \tag{1}$$

где n_{e} , N_2 , N_3 and n_{i} — плотности фотовозбуждённых электронов, занятых ловушек Fe^{2+}, пустых ловушек Fe^{3+} и подвижных ионов соответственно; полное электрическое поле $E = E_{\mathrm{a}} + E_{\mathrm{sc}}$ складывается из поля акустической волны и поля пространственного заряда. В отличие от стандартной теории фоторефракции [4], здесь присутствует быстро осциллирующая компонента E_{a}. Обозначения остальных величин — как в [4].

В приближении слабой акустической волны $\delta n_{\mathrm{e}} << n_{\mathrm{e}}$, $\delta n_{\mathrm{i}} << n_{\mathrm{i}}$, $E_{\mathrm{sc}} << E_0$ система (1) линеаризуется. Решение ищется в виде разложения в ряд Фурье по времени. Это позволяет выделить статическую (не зависящую от времени) компоненту плотности электронов $\delta n_{\mathrm{e},0}$. Она оказывается модулированной по координате как $\cos 2kz$, то есть с пространственным периодом, в два раза меньшим периода акустической волны.

3 Результаты теоретического анализа и их сравнение с экспериментом

3.1 Квадратичная зависимость от амплитуды акустической волны

Анализ показывает, что амплитуда статической модуляции плотности свободных электронов и поле E_{sc} пропорциональны квадрату амплитуды акустического поля E_0^2 (или квадрату амплитуды деформации). Это следствие нелинейности акустоэлектронного взаимодействия, аналогичной эффекту акустоэлектрического тока в пьезополупроводниках. В упрощённом случае без ловушек и ионов получено явное выражение для статической модуляции электронной плотности:

$$dn_{\mathrm{e},0}=\frac{-m_{\mathrm{e}}^{*2}n_{\mathrm{e},0}\cos 2z^{*}}{2\left(1+G_{\mathrm{C}}{}^{2}\right)}\ \epsilon\ \ dn_{\mathrm{e},0,2}\cos 2z^{*}, \tag{2}$$

где z^{*}, μ_{e}^{*} - безразмерные единицы длины и подвижности.

Выражение (2) наглядно демонстрирует появление второй пространственной гармоники $\cos 2kz$. Показано, что даже в отсутствие внешнего поля и при нулевом среднем значении E_{a} нелинейность приводит к перераспределению носителей.

3.2 Характерные времена процессов формирования ФРР

Из анализа однородной части линеаризованной системы выделены три характерных времени релаксации, соответствующих различным физическим процессам:

A) $\tau_A \approx 1/(\beta N_{3,0})$ — быстрая релаксация между свободными и захваченными электронами (установление квазиравновесия в зоне проводимости); этот процесс не сопровождается перераспределением заряда и не создаёт поля;

B) $\tau_B \approx \varepsilon_0 \varepsilon_{LNB}/(e\mu_e n_{e,0})$ — установление пространственного заряда за счёт перераспределения электронов по ловушкам; это время определяет запись решётки при комнатной температуре; его величина хорошо согласуется с экспериментом [2];

C) $\tau_C \approx \varepsilon_0 \varepsilon_{LNB}/(2e\mu_i n_{i,0})$ — перераспределение подвижных ионов, ответственное за термическую фиксацию.

Время насыщения τ_B при типичных экспериментальных параметрах (I ~ 2 кВт/м², N_2/N_3 ~ 0.25) составляет около 20 с, что хорошо согласуется с данными [2] (около 30 с). τ_C при комнатной температуре составляет десятки лет, поэтому ионный транспорт не влияет на запись; при нагреве до 150°C τ_C сокращается до ~ 1.5 ч, что делает возможным эффективное экранирование поля пространственного заряда и последующее проявление решётки (термическая фиксация).

3.3 Поле пространственного заряда

В приближении комнатной температуры (без учёта ионов) получено упрощённое выражение:

$$E_{sc} = \frac{\mu_e^*}{4\Gamma_{ex}} E_0 = \frac{1}{4} \frac{\mu_e E_0^2}{v} \frac{\omega\tau_{ex}}{1 + (\omega\tau_{ex})^2}, \quad (3)$$

где $\upsilon = \omega/k$ — скорость акустической волны, $\tau_{ex} = 1/(\beta N_{3,0})$ — время жизни электрона в зоне проводимости. Максимум E_{sc} достигается при условии $\omega\tau_{ex}=1$, что позволяет оптимизировать частоту акустической волны для максимальной эффективности.

3.4 Сравнение с экспериментом

Расчёты по предложенной модели дают следующие совпадения с данными [2]:

— Δn в максимуме 1.5×10^{-6} (эксперимент: 1×10^{-6});

— зависимость Δn от E_0: квадратичная (эксперимент: степенной показатель p = 1.36±0.22), что в пределах погрешности подтверждает нелинейный механизм;

— время насыщения: 20 с (эксперимент: ~ 30 с);

— отсутствие зависимости Δn от интенсивности освещения в рамках однопримесной модели.

Расхождение наблюдается в абсолютных концентрациях ловушек Fe^{2+}/Fe^{3+}, при которых достигается максимум Δn: расчёт даёт $N_2 = 10^{25}$ м$^{-3}$, эксперимент — на порядки

меньше. Это указывает на необходимость перехода к двухпримесной модели. На рис. 3 эти области обозначены: точка T соответствует расчётному максимуму Δn, точка E — экспериментальному [2].

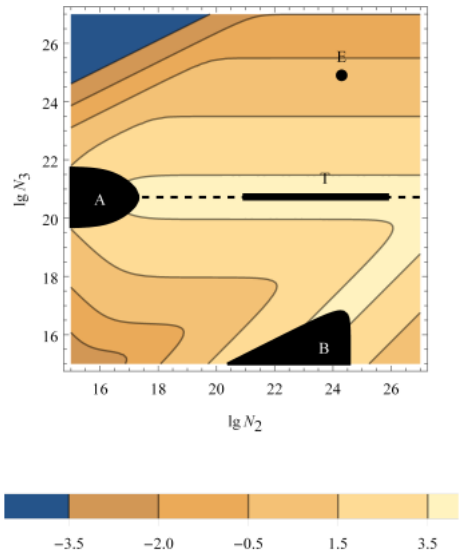


Рисунок 3. Логарифм внутреннего поля $\log_{10}E_{sc}$, В/м в зависимости от концентраций N_2 и N_3. Точки T и E — расчётный и экспериментальный максимумы Δn [2].

3.5 Обсуждение и перспективы

Предложенная модель впервые даёт количественное описание акустофоторефрактивного эффекта. Максимальная амплитуда модуляции ($\Delta n \sim 10^{-6}$) в эксперименте [2] достигается в условиях применимости нашей модели ($\mu_e E_0/\upsilon < 1$). При этом предсказываемые поля E_{sc} могут достигать 10^7 В/м, что превышает порог переполяризации в $LiNbO_3$ (10^4 В/м), открывая возможность создания периодических доменных структур (PPLN) с помощью акустических волн [3].

Основные ограничения использованной модели:

— применимость только для слабых акустических полей (параметр $\mu_e E_0/\upsilon$ должен быть много меньше единицы); при нарушении этого условия необходимо решать полную нелинейную систему;

— необходимость двупримесной модели при малых концентрациях Fe^{3+} (ниже 10^{24} м$^{-3}$), когда начинает сказываться истощение ловушек и вклад других примесных уровней;

— рассмотрение только одномерного случая продольной волны; в реальных экспериментах могут возбуждаться и другие моды, что требует учёта тензорных свойств пьезоэффекта.

Дальнейшее развитие теории акустофоторефрактивного эффекта включает решение полной нелинейной системы, учёт различных типов акустических волн (включая поверхностные) и распространение на другие пьезоэлектрические фоторефрактивные материалы.

Заключение

Разработана теоретическая модель формирования ФРР в $LiNbO_3$:Fe под действием cOAB при равномерном освещении. В однопримесном приближении получены аналитические выражения для поля пространственного заряда, характерных времён записи и фиксации. Установлена квадратичная зависимость амплитуды решётки от амплитуды акустической волны. Сравнение с экспериментом [2] показало хорошее согласие по основным параметрам, однако выявило необходимость уточнения модели (например, переход к двухпримесной схеме) для полного согласования концентрационных зависимостей.

Список литературы

1. *Günter P., Huignard J.-P. (eds.)* Photorefractive Materials and Their Applications 1: Basic Effects. – Springer, 2006. – (Springer Series in Optical Sciences, Vol. 113).

2. *Владимирцев Ю. В., Голенищев-Кутузов А.В.* Объемный акусторефрактивный эффект // Письма в ЖТФ. 1983. Т. **9**, № 15. С. 909–912.

3. *Быстров О. В., Голенищев-Кутузов А. В.* Акустически индуцированная доменная структура в ниобате лития // Письма в ЖЭТФ. 1995. Т. **61**, С. 128–130.

4. *Kukhtarev N. V., Markov V. B., Odulov S. G. et al.* Holographic storage in electrooptic crystals. I. Steady state // Ferroelectrics. – 1978. – V. **22**. – P. 949–960.

5. *Volk T., Wohllecke M.* Lithium Niobate. Defects, Photorefraction and Ferroelectric Switching. – Springer, 2008. – 250 p.

6. *Hertel P., Ringhofer K. H., Sommerfeldt R.* Theory of Thermal Hologram Fixing and Application to $LiNbO_3$:Cu // Phys. Stat. Sol. (a). – 1987. – V. **104**. – P. 855–862.

7. *Владимирцев Ю.В., Голенищев-Кутузов А.В., Голенищев-Кутузов В.А.* Акустооптическое взаимодействие в фоторефрактивных средах и его приложения (обзор) // Акуст. ж. 1995. Т. **41**, № 3. С. 357–363.

8. *Leavitt R. P.* Phenomenological theory of the acoustophotorefractive effect // Appl. Phys. Lett. – 1979. – V. **34**. – P. 771–773.

УДК: 537.86 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39615

Исследование согласования пьезоэлектрического многоэлементного преобразователя фильтрового типа для высокочастотной акустооптической ячейки Брэгга с передающей СВЧ линией

М.Б. Вердиян[1a], С.В. Заварин[2b], И.Г. Кайгородова[3c],

Е.Л. Никишин[4d], М.В. Павлова[5e]

[1-5]*Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.*

410054, Россия, г. Саратов, ул. Политехническая, 77

E-mail: [a]maxverd4@gmail.com, [b]svz74@mail.ru, [c]piezon@yandex.ru,

[d]nikel-55@yandex.ru, [e]pavlovam@yandex.ru

Аннотация: Проведён анализ входного волнового сопротивления реального пьезоэлектрического преобразователя фильтрового типа широкополосной акустооптической ячейки Брэгга СВЧ диапазона. На основе топологии преобразователя методом последовательных приближений составлена его электрическая эквивалентная схема. Получены аналитические выражения для расчёта входного волнового сопротивления и КСВ преобразователя. Показано, что волновое входное сопротивление имеет комплексный характер, реактивная составляющая которого зависит от коэффициента преобразования электромагнитной энергии в акустическую в элементах преобразователя и от активных потерь энергии в них. Установлено наличие частот, на которых реактивная составляющая волнового сопротивления близка к нулю и на которых КСВ преобразователя минимален, а преобразователь хорошо согласуется с передающей СВЧ линией в широком диапазоне длин радиоволн. Теоретические расчёты подтверждаются экспериментально.

Ключевые слова: акустооптическая ячейка Брэгга, волновое сопротивление, пьезоэлектрический преобразователь, коэффициент стоячей волны.

Investigation of matching a piezoelectric multi-element filter-type transducer for a high-frequency Bragg acousto-optic cell with a microwave transmission line

M.B. Verdiyan[1a], S.V. Zavarin[2b], I.G. Kaigorodova[3c],

E.L. Nikishin[4d], M.V. Pavlova[5e]

[1-5]*Yuri Gagarin State Technical University of Saratov*

77 Politechnicheskaya St., Saratov 410054, Russia

E-mail: [a]*maxverd4@gmail.com*, [b]*svz74@mail.ru*, [c]*piezon@yandex.ru*, [d]*nikel-55@yandex.ru*, [e]*pavlovam@yandex.ru*

Abstract: The analysis of the input wave resistance of a real piezoelectric transducer of the filter type of a broadband acousto-optical Bragg cell of the ultra-high frequency range is carried out. Based on the topology of the transducer, its electrical equivalent circuit has been compiled using the method of successive approximations. Analytical expressions for calculating the input wave resistance and standing wave ratio (SWR) of the transducer are obtained. It is shown that the wave input resistance has a complex character, the reactive component of which depends on the coefficient of conversion of electromagnetic energy into acoustic energy in the transducer elements and on the active energy losses in them. It has been established that there are frequencies at which the reactive component of the wave resistance is close to zero and at which the SWR of the transducer is minimal, and the transducer is in good agreement with the transmitting ultra-high frequency line over a wide range of radio wavelengths. The theoretical calculations are confirmed experimentally.

Keywords: acousto-optical Bragg cell, wave resistance, piezoelectric transducer, standing wave ratio

PACS: 42.79.Jq, 41.20.Jb.

Введение

В современных системах обработки информации и связи актуальна задача анализа сложных комплексных радиосигналов. Одним из перспективных устройств спектрального анализа сложных радиотехнических сигналов СВЧ диапазона благодаря быстродействию и возможности работы в реальном масштабе времени является система на основе акустооптических приборов.

В качестве устройства ввода информации в такой системе часто используется широкополосный акустооптический элемент (ячейка) Брэгга. Важный параметр этого элемента – полоса рабочих частот наряду с выполнением условия Брэгга акустооптического взаимодействия в широкой полосе частот и диапазоном эффективного преобразования энергии электромагнитного сигнала в акустические волны зависит от широкополосного согласования электроакустического преобразователя ячейки с передающей СВЧ линией.

В плане реализации широкополосного эффективного акустооптического взаимодействия и согласования с передающей линией перспективными являются многоэлементные пьезоэлектрические преобразователи фильтрового типа [1,2].

1 Анализ конструкции преобразователя

Пример реального используемого на практике преобразователя акустооптической ячейки Брэгга фильтрового типа [3] схематически изображён на рис. 1.

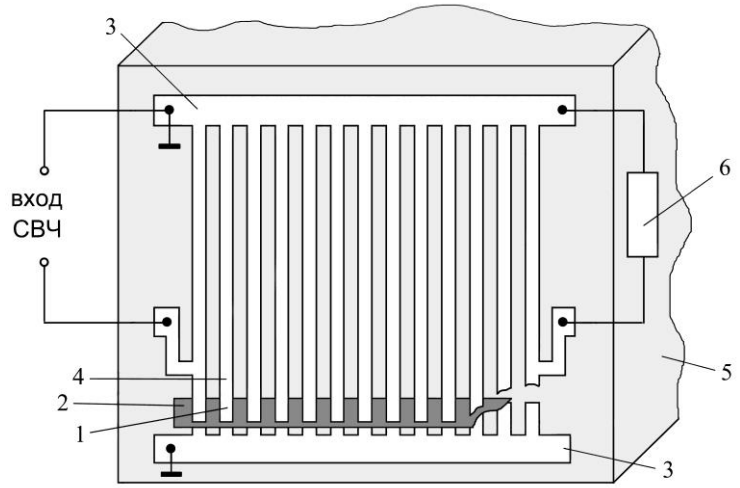


Рис. 1. Схематическое изображение преобразователя фильтрового типа.

Чтобы получить выражение для расчёта КСВ данного преобразователя воспользуемся его эквивалентной электрической схемой. Построение эквивалентной схемы начинаем с анализа емкостного элемента 1 единичного пьезоизлучателя, обозначенного на схеме как C_p (рис. 2). Наряду с электроёмкостью этот элемент из-за полупроводниковых и пьезоэлектрических свойств плёнки 2 оксида цинка (ZnO) обладает внесённой проводимостью G_p. Один контакт соединённых параллельно C_p и G_p подключен к общему проводнику 3 на одном из рёбер фотоупругого кристалла 5. Второй контакт этих элементов посредством линейного проводника 4, который представляет собой индуктивный элемент L и проводимость G, также подключен к общему проводнику 3 на противоположном ребре кристалла 5. Два линейных соседних параллельных проводника 4 от двух соседних пьезоэлементов образуют емкостной элемент C_0 и обладают взаимной индуктивностью L_0. Эти реактивные элементы соединяют между собой соседние излучающие ячейки

многоэлементного пьезоэлектрического преобразователя. Выход преобразователя подключен к согласующей нагрузке 6 с активным сопротивлением 50 ом. В данной схеме (рис. 2) не отображены емкостная и индуктивная связь между параллельными линейными проводниками, отстоящими друг от друга на удалении более одного периода системы и поэтому незначительной. В первом приближении этой связью пренебрегаем.

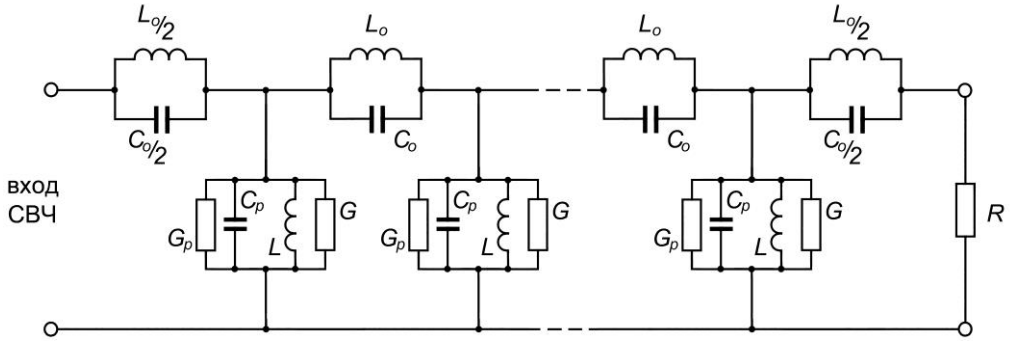


Рис. 2. Эквивалентная электрическая схема преобразователя.

2 Расчет коэффициента стоячей волны

Для расчёта входного сопротивления преобразователя, представляющего собой на эквивалентной схеме последовательную цепочку Т-образных звеньев полосового фильтра, использован метод последовательных итераций определения проводимости отдельного звена в направлении от согласующей нагрузки к входу преобразователя. Выражение для проводимости звена с номером $n+1$ имеет вид:

$$G_{n+1} = \frac{A - jB}{A^2 + B^2},$$

где

$$A = \frac{G_p + G + G1_n}{\left(G_p + G + G1_n\right)^2 + \left(\omega C_p - \frac{1}{\omega L} + G2_n\right)^2},$$

$$B = \frac{\omega L_0}{1 - \omega^2 L_0 C_0} - \frac{\omega C_p - \frac{1}{\omega L} + G2_n}{\left(G_p + G + G1_n\right)^2 + \left(\omega C_p - \frac{1}{\omega L} + G2_n\right)^2}.$$

Здесь $G1_n$ и $G2_n$ соответственно действительная и мнимая части проводимости G_n соседнего звена с номером n.

Задавая $G_1=1/R$ и проводя последовательность итераций для общего числа элементов преобразователя N, на конечном шаге находим действительную и мнимую части входного сопротивления системы A и B. Откуда следует, что модуль коэффициента отражения для передающей линии с чисто активным сопротивлением 50 Ом

$$|\rho| = \sqrt{\frac{(A-50)^2 + B^2}{(A+50)^2 + B^2}}.$$

Коэффициент стоячей волны связан с модулем коэффициента отражения

$$K = \frac{1+|\rho|}{1-|\rho|}.$$

Поскольку пьезоэлектрические преобразователи акустооптических ячеек Брэгга СВЧ диапазона обладают характерными размерами отдельных элементов порядка единиц и долей миллиметров, то померить и проконтролировать параметры индуктивных и емкостных элементов, соответствующих эквивалентной схеме реального преобразователя с распределёнными параметрами, простыми средствами не представляется возможным. Поэтому для их определения был предложен метод последовательного приближения, который заключался в следующем.

На основе проведённых измерений геометрических параметров элементов преобразователя и табличных данных, характеризующих физические свойства применённых материалов, которые, очевидно, могут отличаться от свойств материалов реального преобразователя, проводится предварительный расчёт элементов эквивалентной схемы. Затем полученные данные используются при вычислении КСВ преобразователя. В дальнейшем рассчитанные частотные зависимости КСВ сравниваются с экспериментальными кривыми реального преобразователя. В результате проведённого анализа вносятся корректирующие поправки в расчёт параметров элементов и, возможно, в предварительную эквивалентную схему.

3 Практические результаты

На рис. 3 представлена экспериментальная частотная зависимость КСВ анализируемого преобразователя, полученная с помощью измерителя модуля коэффициента передачи и отражения Р2М-04.

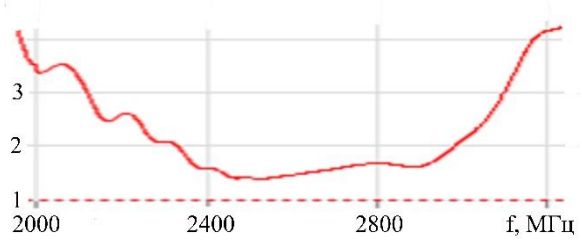


Рис. 3. Экспериментальная частотная зависимость КСВ.

Отметим волнообразный характер кривой, который обусловлен, по нашему мнению, тем, что преобразователь фильтрового типа является волноводной системой. В неидеально согласованной системе преобразователя образуется стоячая волна. Поэтому характер его входного волнового сопротивления зависит от величин элементов системы, а также от

частоты сигнала, скорости его распространения по системе и длины преобразователя. Для малых величин КСВ, меньших 3, эта особенность почти не сказывается на согласовании.

Полученная по приведенным выше формулам теоретическая кривая КСВ с учетом незначительной коррекции рассчитанных величин элементов эквивалентной схемы показана на рис. 4. Отметим, что в процессе расчета КСВ существенно скорректирована была только величина проводимости на СВЧ линейного элемента. Она оказалась гораздо меньше предварительной оценки.

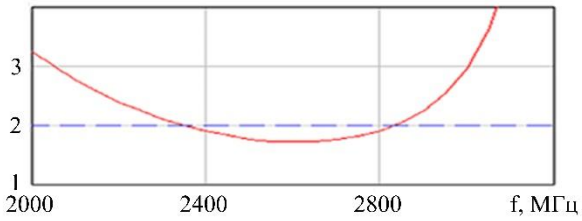


Рис. 4. Рассчитанная частотная зависимость КСВ

Заключение

Таким образом, проведенные исследования показали совпадение по характеру изменения и частотам теоретической и экспериментальной кривых частотной зависимости КСВ и позволили изучить метод предварительного анализа конструкции пьезоэлектрического преобразователя фильтрового типа для акустооптической ячейки Брэгга в плане его согласования с передающей линией СВЧ диапазона. Теоретический расчет частотной зависимости КСВ преобразователя позволяет провести оценку геометрических параметров преобразователя и характеристик материалов для его изготовления, с учетом дополнительных требований к ним, необходимых для реализации акустооптического взаимодействия и генерации упругих волн в широкой полосе частот.

Список литературы

1. *Азраков И.В., Заварин С.В., Никишин Е.Л.* Особенности зависимости дифракционной эффективности акустооптической ячейки Брэгга с многоэлементным преобразователем бегущей волны от его геометрических параметров // Радиотехника и электроника. 2016. **61**, № 5. С. 494.
2. *Никишин Е.Л., Заварин С.В., Васецкий С.О.* Акустооптический элемент Брэгга. Патент RU 2677117. Опубликовано 15.01.2019.
3. *Зюрюкин Ю.А., Заварин С.В., Шехтман Л.А.* Дефлекторы лазерного пучка для акустооптической обработки радиосигналов // Проблемы оптической физики: Материалы 6-й Международной молодёжной научной школы по оптике, лазерной физике и биофизике. - Саратов: Изд-во ГосУНЦ «Колледж». 2003. С. 38.

УДК 535.33:621.373:535 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39616

Изменение фазы оптической волны, управляемое частотой звука

В.М. Котов[1,2] , Аверин С.В[1], Карачевцева М.В[1]

[1]*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН Российская федерация, 141190, Фрязино, Московской обл., пл. Введенского, 1*

[2]*E-mail: vmk6054@mail.ru*

Описан способ формирования оптического излучения с вращающимся вектором поляризации и эффективным изменением его фазы посредством изменения частоты звука в процессе акустооптического (АО) взаимодействия. За основу метода взят режим высокоэффективной брэгговской дифракции излучения с произвольной поляризацией, основанный на двойном прохождении излучения через АО ячейку, изготовленную из гиротропного кристалла, и на свойстве зеркальной поверхности менять циркулярную поляризацию на взаимоортогональную при отражении. Если падающее оптическое излучение является линейно поляризованным, то выходное излучение будет так же линейно поляризованным, однако его вектор поляризации будет вращаться с частотой, равной частоте звуковой волны. Исследования показывают, что с изменением частоты звука происходит изменение фазы оптического луча, обусловленное изменением оптических путей, проходящих составляющими выходного оптического излучения как в анизотропном кристалле, так и вне его, и на зависимости путей от частоты звуковой волны. Это приводит к набегу фазы между компонентами, и, как следствие, к изменению фазы вращения вектора поляризации выходного излучения. Выполнены эксперименты с привлечением АО ячейки, изготовленной из одноосного гиротропного кристалла TeO_2. Получено изменение фазы частоты вращения поляризации оптического излучения с длиной волны 0.63 мкм от 0º до ~ 750º при изменении частоты звука от 30.8 до 31 МГц.

Ключевые слова: акустооптическое взаимодействие, брэгговский режим, акустооптический интерферометр, сдвиг фазы

Optical wave phase change controlled by sound frequency

V.M. Kotov [1,2], S.V. Averin [1], M.V. Karachevtseva .[1]

[1]*Kotel'nikov' Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS, Russia, 141195, Fryazino Moscow Region, Vvedenskogo sq., 1*

[2]*E-mail: vmk6054@mail.ru*

A method for the formation of optical radiation with a rotating polarization vector and an effective change in its phase by changing the frequency of sound in the process of acousto-optical (AO) interaction is described. The method is based on the mode of high-efficiency Bragg diffraction of radiation with arbitrary polarization, based on the double passage of radiation through an AO cell made of a gyrotropic crystal and on the property of a mirror surface to change circular polarization to orthogonal upon reflection. If the incident optical radiation is linearly polarized, then the output radiation will also be linearly polarized, but its polarization vector will rotate with a frequency equal to the frequency of the sound wave. Studies show that with a change in the frequency of sound, the phase of the optical beam changes due to a change in the optical paths passing through the components of the output optical radiation both in and outside the anisotropic crystal, and depending on the paths on the frequency of the sound wave. This leads to a phase shift between the components, and, as a result, to a change in the phase of rotation of the polarization vector of the output radiation. Experiments involving an AO cell made of a uniaxial gyrotropic TeO_2 crystal have been performed. A change in the phase of the rotation frequency of the polarization of optical radiation with a wavelength of 0.63 mcm from 0 ° to ~ 750 ° was obtained with a change in the sound frequency from 30.8 to 31 MHz.

Keywords: acousto-optical diffraction, Bragg regime, acousto-optical interferometer, phase change

PACS: 42.79.Jq – Acousto-optical devices

Введение

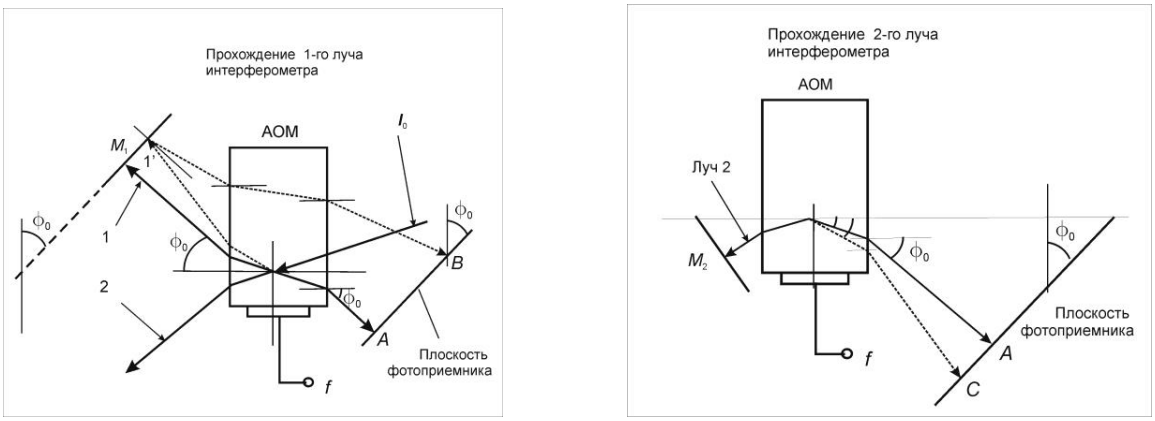
Акустооптическая (АО) брэгговская дифракция позволяет управлять практически всеми параметрами оптического излучения. Наиболее надежным управлением сигналов является частотное управление. Оно обеспечивает бóльшую помехоустойчивость [1]. Приборы, основанные на частотном регулировании, можно использовать для модуляции с конверсией акустической моды, для создания поляризационно-нечувствительных двух-координатных дефлекторов [2], сдвига частоты, вращения плоскости поляризации света [3], и т.д. Большинство АО приборов основано на использовании уникальных свойств монокристалла

TeO_2, сочетающего в себе аномально высокие константы воздействия акустической волны на световое излучение с гиротропными свойствами материала [4]. В частности, АО прибор для формирования излучения с вращающимся вектором поляризации состоит всего из одной АО ячейки из TeO_2 и двух отражающих зеркал. При этом скорость вращения поляризации управляется акустической волной.

В настоящей работе описывается способ управления фазой такого излучения, при этом частота вращения вектора поляризации остается практически неизменной. Управление фазой осуществляется небольшим изменением частоты звуковой волны, распространяющейся в АО ячейке.

1 Теория

В основе АО прибора, позволяющего управлять фазой оптического излучения, лежит АО интерферометр, в котором исходное излучение расщепляется на две волны, похождение каждой из которых изображены на оптических схемах Рис. 1(а) и рис. 1(б), соответственно.



(а) (б)

Рис. 1.Оптическая схема АО интерферометра: а – прохождение 1-го луча, б – прохождение 2-го луча.

На рис. 1,а исходное излучение I_0, попадая в АО модулятор АОМ, в результате дифракции расщепляется в нем на два луча – 1 и 2. Рассмотрим распространение луча 1. Выходя з АО модулятора под углом φ_0, равного углу Брэгга, луч 1 отражается от зеркала M_1 в строго обратном направлении и после повторного прохождения через модулятор попадает в точку *A,* расположенную на входном окне фотодетектора. При изменении частоты звука луч 1 распространяется в направлении луча 1’ (пунктирная линия) и попадает в точку *B* фотоприемника. Таким образом, путь луча 1 изменился, длина его оптического пути стала больше. На рис. 1,б отображено прохождение второго луча 2. При «прямом» прохождении

через модулятор АОМ он не дифрагирует на акустической волне, но после отражения от зеркала M_2 при «обратном» прохождении через АОМ луч 2 претерпевает дифракцию и попадает в ту же точку *A*, что и луч 1 (условие работы интерферометра!). При изменении частоты звука луч 2 при «прямом» распространении через АОМ не дифрагирует на звуке, и отклоняется только после «обратного» распространения через АОМ. Его траектория обозначена пунктирной линией 2'. Луч 2' попадает в точку *C* фотоприемника. Из сравнения прохождения лучей 1 и 2 видно, что «плечи» фотоприемника неодинаковы. Изменение оптического пути луча 1 существенно больше изменения пути 2. Поэтому и набег фазы луча 1 больше набега фазы луча 2. Это приведет к изменению фазы результирующего луча, образованного в результате сложения лучей 1 и 2 на входе фотоприемника.

2 Эксперимент

Для проверки полученного результата был выполнен эксперимент на основе АО интерферометра, в котором использовалась АО ячейка из парателлурита, имевшего размеры 1.0×0.8×0.8 см^3 вдоль направлений [110], $[1\bar{1}0]$ и [001], соответственно. Эксперименты выполнялись в диапазоне частот 29…32 МГц. Угловой юстировкой АО ячейки, а так же зеркал M_1 и M_2 добивалось совмещение двух лучей, представляющих собой компоненты выходного излучения, на расстоянии ~ 1.5 м от ячейки. В нашем случае совмещение реализовывалось на частоте звука 31 МГц. При этом оптическое излучение, проходящее через поляризатор, расположенный перед фотоприемником, регистрировалось в виде синусоидального электрического сигнала. Этот сигнал наблюдался на экране осциллографа. Синхронизация сигнала осуществлялась с помощью сигнала, подаваемого от задающего генератора на АО ячейку. При изменении частоты звука от ~30.8 до 31 МГц сигнал фотоприемника достаточно быстро смещался вправо на несколько амплитуд. Потребовались более точные измерения, которые показали, что полное смещение равно ~1500º, что соответствует смещению фазы оптического сигнала на ~ 750º, поскольку фотодетектор работает в квадратичном режиме. Квадратичный режим приводит к тому, что частота и фаза, снимаемые с фотоприемника, удваиваются. На рис. 2 приведены экспериментальные результаты, описывающие зависимость изменения фазы от частоты звука, объединенные пунктирной линией. Эксперименты выполнялись с шагом 0.04 МГц. При этих измерениях частота генератора измерялась частотомером. Тут же приведена ошибка измерений. Она составила ~ 50º. Видно, что существует достаточно хорошее согласие между теоретической

кривой и экспериментальными результатами. Неполное совпадение результатов мы увязываем с неточностью использованной модели, описывающей показатели преломления одноосного гиротропного кристалла.

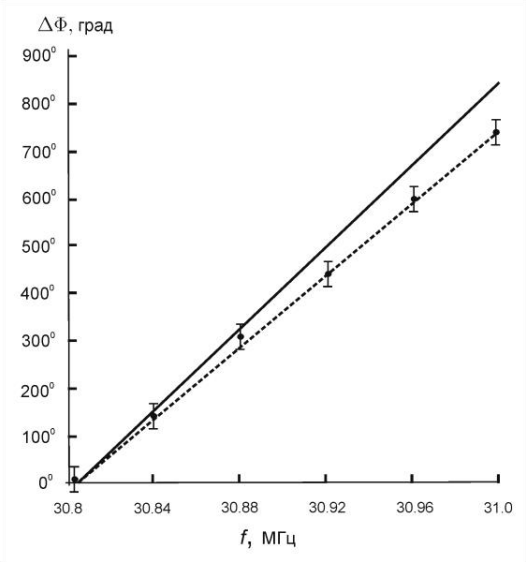


Рис. 2. Зависимость изменения фазы ΔΦ от частоты звука f.

Заключение

Описан метод, позволяющий эффективно управлять фазой частоты вращения вектора поляризации посредством изменения частоты звука, основанный на использовании особенностей АО интерферометра. При этом небольшое изменение частоты генератора не приводит к существенному изменению частоты вращения, но сильно сказывается на фазе вращения вектора поляризации. Эффект изменения фазы основан на изменении оптических путей, проходимых световыми лучами в двух «плечах» интерферометра до их сложения на выходе интерферометра и обусловлен неравенством «плеч» интерферометра.

Экспериментально подтверждено изменение фазы частоты вращения вектора поляризации излучения с длиной волны 0.63 мкм, распространяющегося через АО ячейку из одноосного гиротропного кристалла TeO_2. Получено изменение фазы от 0º до 750º при изменении частоты звука от 30.8 до 31 МГц.

Работа выполнена в рамках Гос.задания № 075-00395-25-00 ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

Список литературы

1. Физическая энциклопедия. Т.3. / *Под ред. Прохорова А.М.* М.: Большая Российская Энциклопедия, 1992, С.178
2. *Антонов С.Н., Резвов Ю.Г.* Акустооптический поляризационно-нечувствительный двухкоординатный дефлектор // Акустический журнал. 2022. **68**. № 3. С.270.
3. *Котов В.М.* Акустооптическая ячейка для управления поворотом плоскости поляризации линейно поляризованного оптического излучения // Квантовая электроника. 2024. **54**. № 3. С. 146.
4. *Warner A.W., White D.L., and Bonner W.A.* Acousto-optic light deflectors using optical activity in paratellurite // J. Appl. Phys. 1972. **43**. P. 4489.

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39617

Лазерные реконфигурируемые оптические ловушки на основе акустооптических фильтров пространственных частот

В.Я. Молчанов, К.Б. Юшков, А.И. Чижиков

НТУЦ акустооптики, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Москва, 119049, Россия E-mail v.ya.molchanov@gmail.com

Аннотация: В данной работе исследуются пространственно-частотные свойства АО неколлинеарных фильтров на основе монокристалла TeO_2 для формирования лазерных пучков бутылочного типа и других типов путём управления фазой пьезоэлектрического преобразователя**.**

Ключевые слова: акусто-оптические неколлинеарные фильтры, лазерные ловушки

1. Введение

Работа посвящена исследованию свойств АО-фильтров пространственных частот для генерации, так называемых, «бутылочных» оптических ловушек для захвата и удержания ансамблей холодных атомов [1].

2. Феномен расщепления 2D пространственной передаточной функции АО-фильтра

АО-фильтры пространственных частот (АОФПЧ) обладают угловой зависимостью фазового синхронизма, что позволяет осуществлять фильтрацию углового спектра лазерного пучка [2].

Пространственная передаточная функция АО-фильтра является функцией одной переменной – частоты. Возможность управления передаточной функции расширяется, если добавить вторую переменную – фазу преобразователя. Управление передаточной функцией АО-фильтра впервые было выполнено на основе противофазной регулярной доменной структуры преобразователя [3]. В настоящей работе перестраиваемая передаточная функция АОФПЧ для произвольной разницы фаз $\Delta\phi$ исследована теоретически и экспериментально. Обнаружено явление расщепления передаточной функции, рис.1 (Синяя линия 1 - одна секция пьезопреобразователя, красная 2 - две секции $\Delta\phi$=0,3π, желтая 3 - две секции $\Delta\phi$=1,3π). В МИСИС разработан и изготовлен пространственный АОФПЧ на основе TeO_2 с двумя преобразователями для независимого фазового $\Delta\phi$ управления, рис.2 и экспериментальный стенд, рис.3 [4].

3. Экспериментальные результаты

Вначале исследования проводились на длине волны 633 нм. 2D передаточные кольцевые функции изготовленного АОФПЧ с фазовым управлением при определенном соотношении

частот f и разности фаз Δϕ преобразователей фильтра демонстрируют расщепление стенок и показаны на рис.4 (вверху). Верхний ряд: f=153,6 МГц, нижний ряд: f=154,0 МГц. Слева направо: (1) синфазная работа секций, $\Delta\phi$=0; (2) $\Delta\phi$=π/2; (3) противофазная работа секций, $\Delta\phi$=π; (4) $\Delta\phi$=3π/2

3D распределение интенсивности расщепленного цилиндрического лазерного поля (типа «термоса») для темной ловушки получено в эксперименте с Ti:sapphire лазером при свободной генерации, рис.4 (внизу) при f =117,2 МГц, λ=799 нм, $\Delta\phi$=240°. Верхний ряд: 2D распределение интенсивности кольцевого лазерного поля вдоль оси Z, средний ряд сечение лазерного поля, проходящего через «термос» плоскостью Y=0, нижний ряд сечение лазерного поля плоскостью X=0. Важна протяженность области «термоса»: отношение длины темной области к диаметру 10:1. Масштаб показан на рис.4.

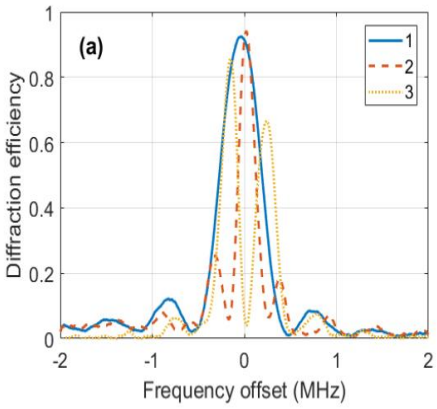


Рис.1

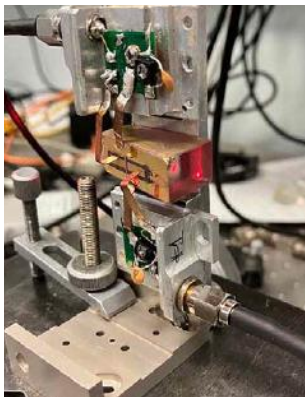


Рис.2

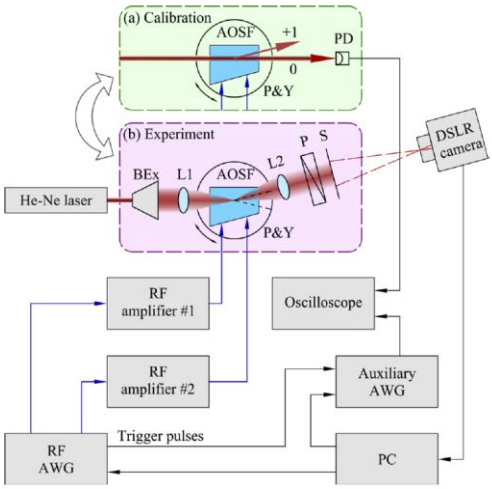


Рис.3

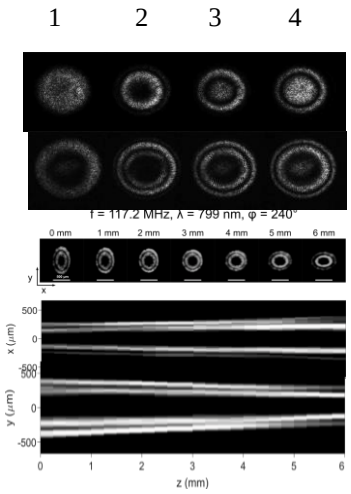


Рис.4

4.Заключение

АО неколлинеарные фильтры пространственных частот позволяют создавать перестраиваемые протяженные монохроматические 3D полые лазерные пучки с двумя расщепленными стенками для оптических ловушек, перспективных для захвата, удержания и транспортировки ансамблей холодных атомов.

Благодарность

Исследование поддержано проектом РНФ 20-12-00348-Р, https://rscf.ru/ru/project/20-12-00348-Р/.

Список литературы

[1] F.K. Fatemi at al., “Dynamic high-speed spatial manipulation of cold atoms using acousto-optic and spatial light modulation,” Opt. Lett. **15**, 3589 (2007).

[2] V.I. Balakshy. “Application of acousto-optic interaction for holographic conversion of light fields,” Optics & Laser Technology **28** (2), 109-117 (1996).

[3] V.Ya. Molchanov, “Acousto-optic TeO2 devices using regular domain structure transducers,” Acta Physica Slovaca, **46** (60), 715 (1996).

[4] K.B. Yushkov, V.Ya. Molchanov. “Phase-tuned acousto-optic spatial filter.” Opt. Lett. **49** (14), 3866 (2024).

Reconfigurable Laser Optical Traps Based on Acousto-Optical Spatial Frequency Filters

Vladimir Molchanov, Konstantin Yushkov, Alexander Chizhikov,

Acousto-Optical Research Center, National University of Science and Technology MISIS, Moscow, 119049, Russia
E-mail v.ya.molchanov@gmail.com

Abstract: The paper examines the spatial-frequency properties of acousto-optic noncollinear filters based on a TeO_2 single crystal for the generation of bottle laser beams and other beams by controlling the phase distribution of a piezoelectric transducer.

1. Introduction

The work is devoted to the study of the features of spatial frequency acousto-optic (AO) filters for generating so-called bottle optical traps for capturing and holding ensembles of cold atoms [1].

2. The phenomenon of splitting of AO filter’s 2D spatial transfer function

AO spatial frequency filters (AOSFs) have angular-dependent phase matching, which allows filtering the angular spectrum of a laser beam [2]. The spatial transfer function of the AOSF is a function with one parameter – frequency. Control of the transfer function can by expanded by using

a second parameter – the transducer phase distribution. Phase control an AOSF was first achieved using $\Delta\phi=\pi$ transducer regular domain structure [3]. In the present paper, the tunable transfer function of the AOSF for an arbitrary phase difference $\Delta\phi$ is investigated theoretically and experimentally. The phenomenon of transfer function splitting is described in Fig. 1: blue line 1 (one section of the transducer), red 2 (two sections $\Delta\phi=0.3\pi$), yellow 3 (two sections $\Delta\phi=1.3\pi$). Custom AOSF based on TeO_2 crystal with two transducers for independent phase $\Delta\phi$ control was developed and manufactured, Fig. 2, as well as an experimental setup, Fig. 3 [4].

3. Experimental results

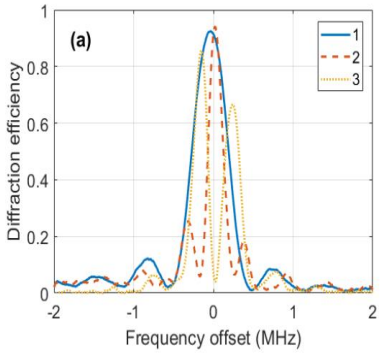


Fig.1

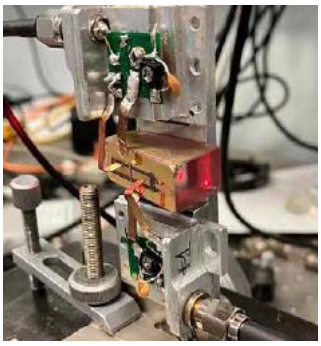


Fig.2

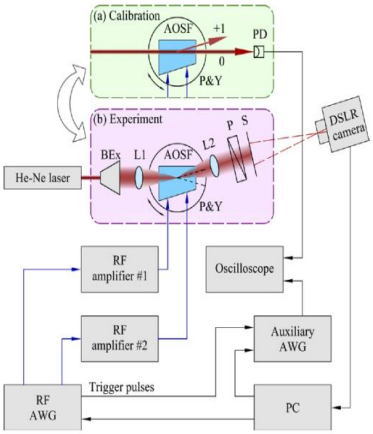


Fig. 3.

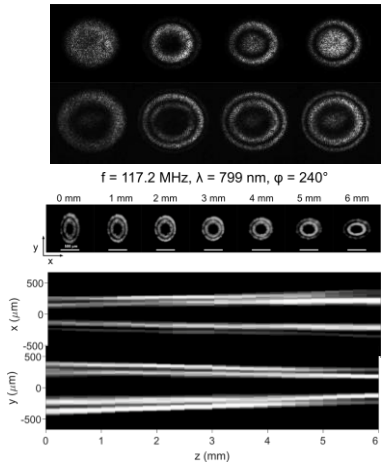


Fig.4

2D ring transfer functions of the phase-controlled AOSF at relevant ratio of frequencies f and phase difference $\Delta\phi$ demonstrate wall splitting, Fig. 4 (top). Top row: f=153.6 MHz, bottom row: f=154.0 MHz. (1) In-phase operation of the sections, $\Delta\phi=0$; (2) $\Delta\phi=\pi/2$; (3) antiphase operation of the sections, $\Delta\phi=\pi$; (4) $\Delta\phi=3\pi/2$, λ=633 nm. 3D intensity distribution of a split cylindrical laser field (like a thermos) for a dark trap was obtained in an experiment with a Ti:sapphire laser in free-running mode, Fig. 4 (bottom) at f=117.2 MHz, λ=799 nm, $\Delta\phi$=240°. Top row: 2D intensity distribution of the annular laser field along the Z axis, middle row: cross-section of the laser field by the Y=0 plane, bottom row: cross-section of the laser field by the X=0 plane. The extent of the

thermos region is important: the ratio of the length of the dark region to the diameter is 10:1. The scale is shown in Fig. 4.

4. Conclusion

Non-collinear AOSFs allow the creation of tunable, extended, monochromatic 3D hollow laser beams with two split walls for optical traps, promising for capturing, holding, and transporting ensembles of cold atoms.

Acknowledgement

The research was supported by RSCF Project 20-12-00348-P, https://rscf.ru/en/project/20-12-00348-P/.

References

[1] F.K. Fatemi et al., “Dynamic high-speed spatial manipulation of cold atoms using acousto-optic and spatial light modulation,” Opt. Lett. **15**, 3589 (2007).

[2]V.I. Balakshy. “Application of acousto-optic interaction for holographic conversion of light fields,” Optics & Laser Technology **28** (2), 109-117 (1996).

[3]V.Ya. Molchanov, “Acousto-optic TeO2 devices using regular domain structure transducers,” Acta Physica Slovaca, **46** (60), 715 (1996).

[4]K.B. Yushkov, A.I. Chizhikov, D.V. Obydennov, V.Ya. Molchanov. “Phase-tuned acousto-optic spatial filter.” Opt. Lett. **49** (14), 3866 (2024).

УДК: 534.221, 535.421, 535.012.21, 534.8.081.7, 534-16. DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39618

Распространение акустических волн в ориентированных акустооптических кристаллах и новые применения устройств

Н.В. Поликарпова[1,a]

[1] *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет,*
Россия,119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.
E-mail: [a]*polikarpnv@yandex.ru*

Исследование посвящено изучению особенностей отражения объемных акустических волн в акустооптическом кристалле при произвольной ориентации падения упругих волн на границу раздела с вакуумом. Анализируются различные типы волн и условия их взаимодействия с материалом. Особое внимание уделено уникальным сценариям отражения, существенно отклоняющимся от общепринятых моделей.

Данная работа представляет собой углубленное исследование особенностей распространения и преобразования упругих колебаний в кристаллических структурах с выраженными акустооптическими свойствами. Основное внимание уделено изучению поведения объемных акустических волн при их взаимодействии с границей раздела кристаллическая среда – вакуум в условиях произвольной пространственной ориентации волнового фронта.

В рамках исследования проведен комплексный анализ физических процессов, сопровождающих распространение различных типов упругих волн в монокристалле парателлурита, включая продольные и сдвиговые волны.

Особый акцент сделан на изучении трансформаций, происходящих при отражении волн от границы раздела. Экспериментальные данные свидетельствуют о наличии нетривиальных эффектов, существенно отличающихся от предсказаний классической теории упругих волн: аномальные изменения фазовых характеристик отраженных волн, нелинейная зависимость коэффициентов отражения от угла падения, возникновение дополнительных волновых мод при определенных ориентациях. Выявленные особенности волновых процессов открывают новые перспективы для разработки современных акустооптических приборов. Полученные результаты имеют большое значение для разработки фундаментальных представлений о взаимодействии акустических и оптических волн в анизотропных средах, а также для решения прикладных задач в области оптической обработки информации и лазерной техники.

Ключевые слова: взаимодействие звуковых и световых волн; механические свойства, зависящие от ориентации; отражение; монокристаллический диоксид теллура

PACS: 01.30.Cc.

Propagation of acoustic waves in oriented acousto-optical crystals and new applications of devices

N.V. Polikarpova[1,a]

Faculty of Physics, M.V.Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia.

E-mail: [a]*polikarpnv@yandex.ru*

The study is devoted to the study of the features of reflection of bulk acoustic waves in an acousto-optic crystal with an arbitrary orientation of incidence of elastic waves on the interface with vacuum. Various types of waves and the conditions of their interaction with the material are analyzed. Particular attention is paid to unique reflection scenarios that significantly deviate from generally accepted models.

This work is an in-depth study of the features of propagation and transformation of elastic vibrations in crystalline structures with pronounced acousto-optic properties. The main attention is paid to the study of the behavior of bulk acoustic waves during their interaction with the interface between the crystalline medium and vacuum under conditions of an arbitrary spatial orientation of the wave front.As part of the study, a comprehensive analysis of the physical processes accompanying the propagation of various types of elastic waves in a paratellurite single crystal, including longitudinal and shear waves, was carried out.

Particular emphasis is placed on the study of the transformations that occur when waves are reflected from the interface. The experimental data indicate the presence of non-trivial effects that differ significantly from the predictions of the classical theory of elastic waves: anomalous changes in the phase characteristics of reflected waves, nonlinear dependence of the reflection coefficients on the angle of incidence, the occurrence of additional wave modes at certain orientations. The revealed features of wave processes open up new prospects for the development of modern acousto-optic devices. The results obtained are of great importance for the development of fundamental concepts of the interaction of acoustic and optical waves in anisotropic media, as well as for solving applied problems in the field of optical information processing and laser technology.

Keywords: interaction of sound and light waves; orientation-dependent mechanical properties; reflection; monocrystalline tellurium dioxide

PACS: 01.30.Cc.

Введение

Современная акустооптика активно развивается благодаря новым анизотропным материалам и метаматериалам с особыми свойствами. Они позволяют эффективно управлять светом с помощью звука, что применяется в оптической связи, лазерных системах и микроскопии.

Ключевую роль играет анизотропия — зависимость скорости звука от направления в кристалле. Это определяет эффективность взаимодействия света со звуком, влияя на дифракцию, селективность и точную настройку устройств.

В высокоанизотропных кристаллах, например парателлурите, обнаружены уникальные эффекты: усиление взаимодействия в определенных направлениях, широкодиапазонные акустические решетки и необычные виды дифракции. Это привело к созданию новых модуляторов и фильтров. Перспективы связаны с метаповерхностями и гибридными устройствами.

Парателлурит, известный сильной анизотропией, демонстрирует аномальное отражение звука от границ. В отличие от предыдущих исследований, рассматривающих частные случаи, здесь изучены разнообразные срезы и типы волн.

Эксперименты выявили сложное перераспределение энергии между волновыми модами в анизотропных средах. Эти закономерности применимы к другим материалам и могут быть использованы в дефлекторах, системах визуализации и устройствах управления светом.

В работе анализируется отражение звуковых волн от границы парателлурита с вакуумом. Волны возбуждались пьезопреобразователями на частотах в сотни мегагерц. Несмотря на сильную анизотропию, формируются узкие ультразвуковые пучки. Это подтверждено методами визуализации и описано моделью плоских волн.

Результаты важны для создания дефлекторов, фильтров, систем визуализации и оптимизации преобразователей. Дальнейшие исследования будут направлены на другие материалы и уточнение теоретических моделей.

Исследование отражения акустических волн на границе анизотропных кристаллов

Свойства акустических волн критически важны для акустооптических процессов, поскольку структура пучка определяет характер дифракции [1-19]. Кристаллы типа парателлурита с выраженной упругой анизотропией демонстрируют уникальные эффекты, не наблюдаемые в изотропных средах [1-19].

В данном исследовании применяется комплексный подход к анализу отражения акустических волн на границе кристалл-вакуум. Рис. 1(а) иллюстрирует схему процесса. Метод анализа сечений фазовых скоростей позволяет учесть распространение квазипродольных (QL) и квазипоперечных (QS) волн в анизотропной среде. Анализ векторной диаграммы (рис. 1(б)) показывает: Волновой вектор K_1 волны имеет произвольную ориентацию относительно нормали к границе, параметры отражения существенно зависят от угла падения, угол среза кристалла относительно оси X остается

постоянным. Методика включает в себя: построение 3D-моделей фазовых скоростей, сравнительный анализ волновых мод, учет анизотропии кристалла при интерпретации

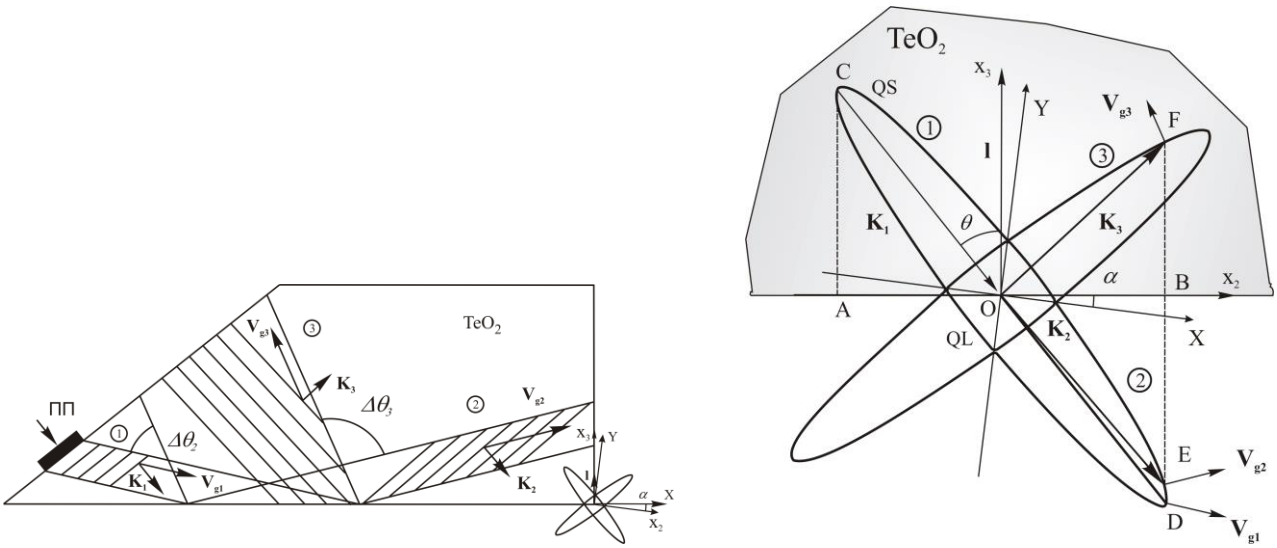


Рис. 1. Схема отражения упругих волн в кристалле парателлурита.

(а) Принципиальная схема отражения упругих волн в кристалле парателлурита. Граничная система координат x_2x_3 составляет угол α с осями XY. Волновой вектор падающей волны $\boldsymbol{K_1}$ представлен цифрой (1) и составляет угол θ с нормалью к границе $\boldsymbol{n}$. Отраженные волны задаются цифрами (2) и (3), волновыми векторами $\boldsymbol{K_2}$ и $\boldsymbol{K_3}$, а также векторами групповых скоростей $\boldsymbol{V_{g2}}$ и $\boldsymbol{V_{g3}}$.

(б) Волновые векторы и векторы групповой скорости в кристалле парателлурита в плоскости XY. Граничная система координат x_2x_3 составляет угол α с осями XY. Волновой вектор $\boldsymbol{K_1}$ падающей волны (1) направлен под углом падения θ относительно нормали $\boldsymbol{n}$ к границе. Отраженные волны, показанные цифрами (2) и (3), задаются волновыми векторами $\boldsymbol{K_2}$, $\boldsymbol{K_3}$ и соответствующими векторами групповых скоростей $\boldsymbol{V_{g2}}$ и $\boldsymbol{V_{g3}}$.

Ключевой особенностью является акустическая анизотропия - резкое изменение скорости звука в зависимости от направления в кристалле. Это приводит к расхождению путей распространения энергии и волнового фронта. В парателлурите разница между векторами энергии и фазовой скорости достигает 74°.

Особый интерес представляет случай, когда угол падения превышает 90°. В классической волновой теории это приводит к полному прекращению передачи энергии через границу. В анизотропных средах такой эффект требует специальных математических методов для анализа волновых полей и процессов преобразования на границах раздела.

Результаты расчета

Исследования выявили уникальное явление в анизотропных кристаллах, таких как парателлурит: угол падения акустической волны может превышать 90 градусов. Этот парадоксальный эффект объясняется несовпадением направления распространения энергии (групповой скорости) с направлением волнового фронта (фазовой скоростью), что делает принципиально важным учет групповой скорости при анализе процессов отражения.

Экспериментально установлено, что угол падения не только значительно превышает 90°, но и варьируется в широком диапазоне, при этом энергия волны продолжает воздействовать на границу раздела кристалл-вакуум. В зависимости от конкретного угла падения наблюдаются различные сценарии отражения. Анализ графических данных (рис. 2) показывает, что пространственное разделение отраженных пучков происходит лишь в определенных интервалах углов, тогда как в промежуточных диапазонах отражение вообще отсутствует.

Характер отражения существенно варьируется: в разных условиях могут формироваться либо две волны различных типов (QL и QS), либо исключительно одна QS-волна. Наблюдается сложная динамика распространения волн: они могут двигаться в противоположных направлениях, при определенных углах отраженная волна распространяется точно навстречу падающей, а угол разделения пучков способен резко изменяться при достижении критических значений.

Особый научный интерес представляет ситуация, когда при угле падения свыше 90° обе отраженные волны проявляют свойства квазипоперечных. В этом случае угловое расхождение между пучками постепенно уменьшается с ростом угла падения и стабилизируется в достаточно широком диапазоне.

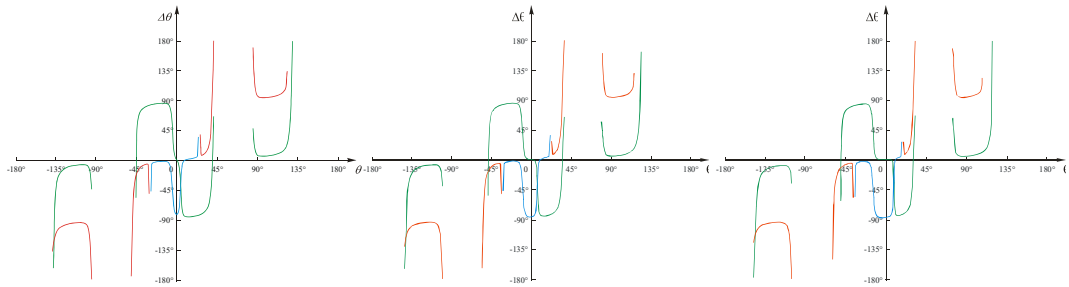
Эти необычные эффекты наглядно демонстрируют исключительную сложность волновых процессов в анизотропных средах и подчеркивают фундаментальную важность учета групповой скорости при анализе явлений отражения. Полученные результаты имеют существенное практическое значение для разработки перспективных акустооптических устройств, где требуется точное управление направлением распространения энергии.

Обнаруженные явления играют ключевую роль в изучении поведения упругих волн в анизотропных средах. Наблюдаемое ограничение волновых мод углубляет понимание механизмов трансформации волновых фронтов на границах раздела и условий направленного переноса акустической энергии в кристаллах. Эти эффекты демонстрируют сложные сценарии акустического отражения с формированием множественных расходящихся пучков, что представляет значительный практический интерес.

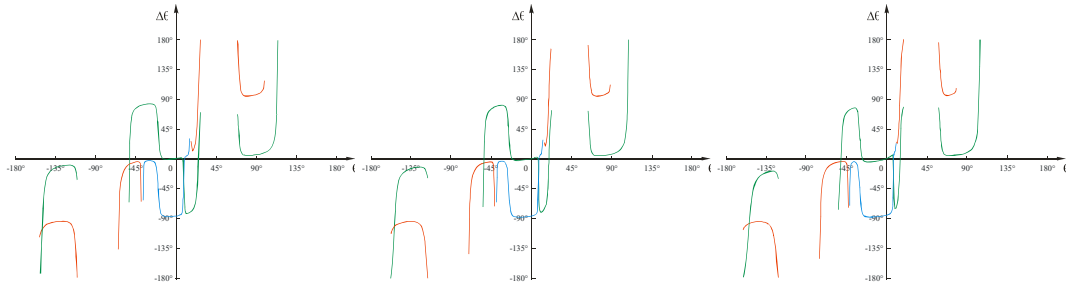
Данные исследования открывают новые возможности для разработки перспективных акустооптических систем, способных работать не только в классическом поперечном, но и в коллинеарном режиме дифракции света на ультразвуке. Современные технические решения включают усовершенствованные устройства, использующие отражение звуковых волн от свободных поверхностей кристаллов парателлурита. Среди практических применений можно выделить специализированные акустооптические фильтры, учитывающие как сохранение типа акустической моды при отражении, так и конверсию продольных волн в сдвиговые.

Особую значимость приобретает использование акустического отражения для решения задач ввода оптического излучения в кристаллические структуры. Этот подход особенно эффективен, когда возбуждение акустических волн осуществляется на грани, не совпадающей с оптическими входными и выходными поверхностями элемента.

Фундаментальные исследования закономерностей распространения акустических волн имеют междисциплинарное значение, выходящее за рамки акустики, акустоэлектроники и акустооптики. Полученные результаты могут быть применены в различных областях современной физики, включая изучение магнитных плёнок, метаповерхностей и объёмных метаматериалов. Ярким примером служат исследования распространения электромагнитных волн в тонких магнитных слоях, где наблюдается существенное расхождение направлений фазовой и групповой скоростей. Аналогичные эффекты выявлены в слоистых композициях, где направление переноса упругой энергии значительно отклоняется от вектора фазовой скорости, что создаёт основы для моделирования подобных явлений в искусственно структурированных метаматериалах.



(а) cut angle - a = 5^0 (б) cut angle - a = 10^0 (в) cut angle - a = 15^0



(г) cut angle - a = 20^0 (д) cut angle - a = 25^0 (е) cut angle - a = 30^0

45^0

Рис. 2. Зависимости угла пространственного разделения пучков $\Delta\theta$ от угла падения θ для двух отраженных волн (2) и (3) в плоскости XY в интервале углов падения $-180^0 \leq \theta \leq 180^0$ при различных углах среза.

Заключение

В рамках исследования был выполнен детальный анализ уникальных механизмов отражения волн на границах анизотропных кристаллов. С помощью специально разработанных диаграмм удалось визуализировать и выявить характерные закономерности этих процессов. Особый интерес представляет феномен реверсивного отражения, когда волна меняет направление на противоположное при ненулевом угле падения. Этот эффект

наблюдается в широком диапазоне углов для различных типов волн без необходимости создания специальных условий.

Экспериментальные результаты показывают, что энергетическая эффективность такого отражения может достигать значительных величин с максимумом при определенных параметрах. Выраженность этого явления непосредственно связана с уровнем акустической анизотропии материала. Полученные данные позволяют предположить возможность аналогичных эффектов в других кристаллических структурах со сравнимой степенью упругой анизотропии.

Практическая ценность работы заключается в потенциальном применении обнаруженных закономерностей при создании акустооптических устройств: модуляторов, отклоняющих систем и фильтров. Установленные принципы взаимодействия световых и акустических волн могут быть распространены на среды с выраженной анизотропией других физических свойств, включая оптические и магнитные материалы. Это создает новые возможности для разработки перспективных устройств в различных областях волновой физики.

Исследование проводилось по государственному заданию Московского государственного университета имени Ломоносова.

Список литературы

1. *Burov V., Voloshinov V., Dmitriev K., Polikarpova N.* // Phys. Usp. 2011. **54.** P. 1165–1170.
2. *Amarasinghe P.M., Kim J., Triverdi S., Soos J., Diestler M., Jin F., Qadri S.B., Gupta N., Jensen J.L., Jensen J.* // Proc. SPIE. 2017. **10404.** P. 104040T.
3. *Mantsevich S., Balakshy V., Molchanov V., Yushkov K.* // Ultrasonics. 2015. **63.** P. 39–46.
4. *Voloshinov V., Djakonov E., Polikarpova N.* // Opt. Spectrosc. 2015. **118.** P. 166–174.
5. *Martynyuk-Lototska M., Kushnirevych B., Zapeka O., Krupych O., Kokhan O., Pogodin A., Peresh E., Mys O., Vlokh R.* // Appl. Opt. 2015. **54.** P. 1302–1308.
6. *Lock E.* // Phys. Usp. 2008. **51.** P. 375–393.
7. *Mantsevich S.* // Ultrasonics. 2016. **70.** P. 92–97.
8. *Polikarpova N., Voloshinov V., Reznikov A.* // Phys. Wave Phenom. 2015. **23.** P. 52–57.
9. *D'yakonov E., Voloshinov V., Polikarpova N.* // Acoust. Phys. 2012. **58.** P. 107–116.
10. *Voloshinov V., Polikarpova N.* // Appl. Opt. 2009. **48.** P. C55–C66.
11. *Voloshinov V., Polikarpova N., Declercq N.J.* // J. Acoust. Soc. Am. 2009. **125.** P. 772–779.
12. *Declercq N.F., Polikarpova N.V., Voloshinov V.B., Leroy O., Degrieck J.* // Ultrasonics. 2006. **44.** P. e833–e837.
13. *Gupta N., Voloshinov V., Knyazev G., Kulakova L.A.* // J. Opt. 2012. **14.** P. 035502.
14. *Kastelik J.C., Gazalet M., Bruneel C., Bridoux E.* // J. Appl. Phys. 1993. **74.** P. 2813–2817.

15. *Goutzoulis A., Pape D.* Design and Fabrication of Acousto-Optic Devices. Dekker, 1994.
16. *Auld B.* Acoustic Fields and Waves in Solids. Robert Krieger, 1990.
17. *Yariv A., Yeh P.* Optical Waves in Crystals. Wiley, 1984.
18. *Voloshinov V., Polikarpova N., Mozhaev V.* // Acoust. Phys. 2006. **52.** P. 245–251.
19. *Kastelik J.C., Gharbi M., Gazalet M.* // J. Appl. Phys. 1998. **84.** P. 671–674.

УДК: 535.421. DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39619

Акустооптические ячейки на двуосных кристаллах в системах пространственной фильтрации двухцветных световых полей

М.И. Купрейчик[1,a], С.Н. Манцевич[1,b], В.И. Балакший[1,c]

[1] *МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет. 119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинские горы, МГУ имени М.В. Ломоносова, дом 1, строение 2*

E-mail: [a]maxim10111992@gmail.com, [b]manboxx@mail.ru, [c]balakshy@phys.msu.ru

В работе изучена возможность применения варианта широкоапертурного акустооптического взаимодействия в двуосном кристалле с симметричной кольцевой двумерной передаточной функцией в системах двухцветной оптической ловушки. Конкретные расчеты проведены для орторомбического кристалла йодноватой кислоты и двухцветного оптического излучения с длинами волн компонент, близкими к 1 мкм. Для компенсации спектральной зависимости угла Брэгга выбранной широкоапертурной геометрии предложено использовать в качестве возбудителя ультразвука пластинку из ниобата лития с регулярной доменной структурой. Рассчитаны передаточные функции акустооптической ячейки, работающей в двухчастотном режиме. Проведена оценка минимального интервала между спектральными компонентами светового пучка, при котором возможна их независимая пространственная фильтрация в ячейке. Доказана перспективность применения выбранного режима акустооптического взаимодействия в кристалле йодноватой кислоты в системах генерации двухцветных кольцевых полей, спектральный интервал между компонентами которых не превышает 100 нм.

Ключевые слова: оптические ловушки, широкоапертурная акустооптическая дифракция, двуосные кристаллы, PPLN-пьезопреобразователи.

PACS: 78.20.Hp

Acousto-optic cells on biaxial crystals in bichromatic light field spatial filtering systems

M.I. Kupreychik[1,a], S.N. Mantsevich[1,b], V.I. Balakshy[1,c]

[1] *Faculty of physics, M.V. Lonomosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia*

E-mail: [a]maxim10111992@gmail.com, [b]manboxx@mail.ru, [c]balakshy@phys.msu.ru

In this paper, we examine the prospects of a special wide-angle acousto-optic interaction mode in a biaxial crystal with a symmetrical annular two-dimensional transfer function applying in

bichromatic optical traps. Specific calculations were performed for an orthorhombic alpha-iodic acid crystal and two-color optical radiation with component wavelengths close to 1 μm. To compensate for the spectral drift of the Bragg angle of the selected wide-aperture geometry, we propose to use a lithium niobate plate with a regular domain structure as an ultrasound transducer. The transfer functions of an acousto-optic cell operating in a two-frequency mode are calculated. The minimum interval between the spectral components of a light beam is estimated, at which their independent spatial filtering in a cell is possible. The promising application of the specified acousto-optic interaction mode in an alpha-iodic acid crystal to generate bichromatic ring fields, the spectral interval between the components of which does not exceed 100 nm, is proved.

Keywords: optical traps, wide-angle acousto-optic diffraction, biaxial crystals, PPLN piezoelectric transducers.

PACS: 78.20.Hp

Введение

Разработка методов формирования лазерных полей с быстро перестраиваемыми пространственными характеристиками является одной из наиболее актуальных задач современной оптики. Такие поля широко используются в спектроскопии, литографии и оптических пинцетах, предназначенных для перемещения и сортировки микрочастиц, а также управления ансамблями холодных нейтральных атомов. Часть из перечисленных задач оптического манипулирования требует создания трехмерных субмиллиметровых областей с низкой освещенностью, имеющихся у так называемых бутылочных пучков. На практике, для формирования таких пучков обычно используют пространственный ЖК модулятор света [1,2]. В то же время, как показано в работе [3], в ряде случаев его можно качественно заменить формирователем пучка на базе акустооптического (АО) фильтра, отличающимся на три порядка более высоким быстродействием (~ 10 мкс). В таком формирователе динамическое управление поперечным амплитудным профилем пучка осуществляется за счет формы двумерной передаточной функции (ДПФ) АО-фильтра, зависящей от частоты управляющего радиосигнала.

Для приложений прецизионной метрологии и квантовых вычислений критична долговременность удержания холодных нейтральных атомов в оптической ловушке. Один из известных способов ее обеспечения состоит в использовании двухцветного лазерного поля, компоненты которого имеют разную (красную и синюю) отстройку от линии поглощения атома и заметно отличающийся поперечный амплитудный профиль [4,5]. Такой пучок создает сильно локализованную (по одной из координат) ловушку с крутыми потенциальными стенками. Возможности быстрого управления параметрами кольцевой

двухцветной ловушки, создаваемой вышеупомянутым АО-формирователем пучка на кристалле парателлурита, продемонстрированы в работе [6]. Среди прочего в ней показано, что основным ограничивающим фактором тут является сильное (~ 10% от рабочей угловой апертуры) смещение центра ДПФ, возникающее при переключении между НЧ и ВЧ режимами пространственной фильтрации. Кроме того, типичное для парателлуритных фильтров с углом среза $\chi < 12°$ невысокое спектральное разрешение ограничивает допустимый минимальный интервал между компонентами двухцветного лазерного поля величиной порядка 10 нм. Отметим, что использованию в обсуждаемом здесь формирователе пучка коммерчески доступных парателлуритных АО-фильтров с бóльшими значениями угла χ ($\chi \sim 15°$) препятствует выраженная эллипсность их ДПФ [3]. Анализ показал, что негативное влияние перечисленных факторов можно заметно ослабить, используя АО-фильтр на двуосном кристалле с круговой ДПФ. Такой прибор работает на основе специального режима широкоапертурной АО-дифракции в одной из главных плоскостей, найденного в работе [7]. Целью настоящей работы была оценка перспективного применения такого фильтра на кристалле йодноватой кислоты (α-HIO_3) в системах двухцветных быстро перестраиваемых оптических ловушек с длинами волн компонент, близкими к 1 мкм.

Йодноватая кислота – монокристалл аксиального класса (*222*) орторомбической сингонии. Материал прозрачен в видимом и ближнем ИК-диапазоне от 0.4 до 1.3 мкм. Главные показатели преломления кристалла рассчитывались из формул Сельмейера [8]. Для света с $\lambda = 1$ мкм они равны: $n_X = 1.815$, $n_Y = 1.930$, $n_Z = 1.953$. На этой длине волны обозначенный режим АО-дифракции реализуется в плоскости *XY* при распространении сдвиговой акустической моды с сагиттальной поляризацией под углом $\chi \approx 10.1°$ к оси *Y*. В таком случае ее скорость приблизительно равна 2 км/с.

1 Результаты расчетов

Частотные зависимости угла Брэгга $\theta_B(f)$ для анизотропного рассеяния оптической *s*-моды (процесс $s \rightarrow f$) в срезе $\chi \approx 10.1°$ плоскости *XY* кристалла α-HIO_3 представлены на рис. 1, а. Расчеты проведены для трех различных длин волн оптического излучения: 0.8, 1 и 1.2 мкм. Символом «Ф» показана рабочая точка широкоапертурной геометрии; для света с $\lambda = 1$ мкм она реализуется на частоте $f_0 = 273.6$ МГц при угле падения *s*-моды $\theta_0 = 34.8°$. Из графиков видно, что в йодноватой кислоте данная геометрия подвержена сильному спектральному дрейфу, затрудняющему ее применение в перестраиваемых АО-фильтрах. Так, в диапазоне от 0.8 до 1.2 мкм изменение угла θ_0 составляет 3.4°, что сравнимо с реализуемым в таком АО-фильтре углом разделения пучков. В случае с АО-формирователем профиля пучка, для подстройки под меняющийся угол θ_0 необходимо предварительно

расслоить пучок по длинам волн (перед фокусировкой в центр области АО-взаимодействия), сохраняя плоскостность его волнового фронта. Для геометрии на рис. 1, а было найдено, что величина разведения компонент с $\lambda = 0.9$ и 1.1 мкм должна составлять примерно 30% от диаметра пучка на выходе расширителя. Более подробный анализ показал, что при работе в интервале от 0.95 до 1.05 мкм возможен другой, более простой способ компенсации дисперсии угла θ_0, основанный на применении в качестве возбудителя ультразвука многоэлементной противофазной решетки преобразователей. В таком случае отвечающий исследуемой геометрии угол среза кристалла уменьшается до $\chi \approx 7.2°$, а оптимальный период противофазной решетки d составляет 140 мкм. На практике подобное значение d легко обеспечивается технологичным преобразователем с регулярной доменной структурой (РДС) [9]. Дисперсия $\Delta\theta_w(\lambda)$ угла падения θ_w (при $\lambda = 1$ мкм последний равен 37.7°) широкоапертурной геометрии в АО-фильтре такой конструкции показана на рис. 1, б. Можно видеть, что изменение угла θ_w в этом случае не превышает 0.03°. Как будет показано далее, эта величина примерно в 5 раз меньше максимального смещения ДПФ ячейки при переходе между режимами фильтрации, что делает обсуждаемую компенсацию эффективной. Штрихпунктирной кривой на рис. 1, б показана перестроечная кривая $f_w(\lambda)$ исследуемого АО-фильтра, которая в выбранном спектральном диапазоне хорошо аппроксимируется линейной функцией.

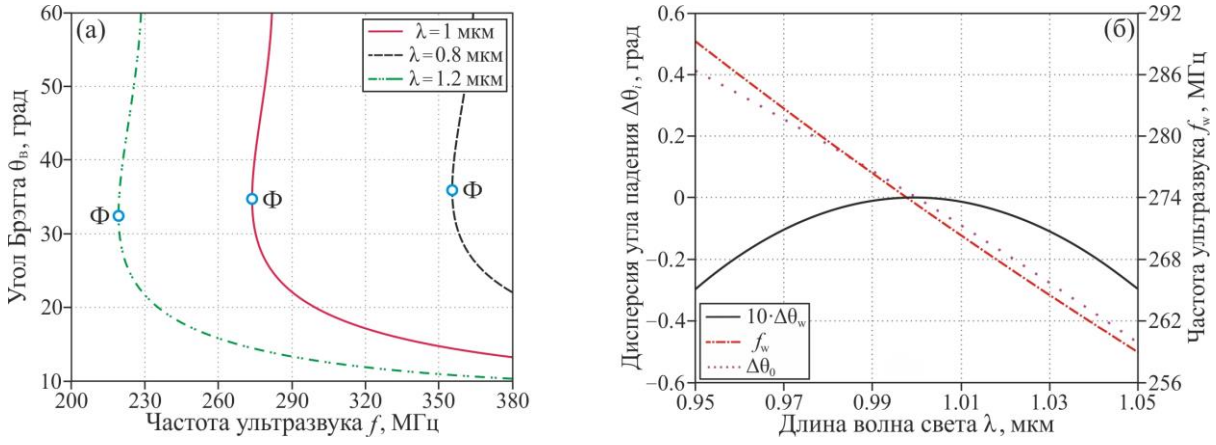


Рис. 1. Частотные зависимости угла Брэгга в срезе $\chi = 10.1°$ плоскости *XY* кристалла α-HIO_3 (а) и параметры широкоапертурной дифракции в АО-ячейке с однородным (а,б) и PPLN-пьезопреобразователем (б).

Как известно, применению фазированных преобразователей в гиперспектральных АО-фильтрах препятствует возникновение паразитных окон пропускания, связанных с двухлепестковой структурой диаграммы направленности (ДН) излучателя. Для оценки влияния паразитного лепестка ДН преобразователя с РДС на работу предлагаемого АО-формирователя пучка на кристалле α-HIO_3 были рассчитаны частотно-спектральные (при $\theta_i = 37.7°$) и спектрально-угловые (при $f = 258.9$ МГц) характеристики АО-ячейки. Результаты расчетов показаны на рис. 2. Для облегчения восприятия полная ширина

преобразователя была выбрана равной 1.4 мм, что на порядок меньше ее оптимального значения. Нижний (левый) диапазон на рис. 2, а (рис. 2, б) отвечает неиспользуемому лепестку ДН излучателя. Из графиков следует, что при рабочей угловой апертуре в 6° (внутри кристалла) исследуемый фильтр на йодноватой кислоте позволяет раздельно управлять амплитудным профилем компонент двухцветного лазерного поля, интервал между которыми не превышает 100 нм.

Для оценки величины минимального интервала между компонентами поля было проведено моделирование двумерных угловых характеристик исследуемой АО-ячейки при работе в одночастотном и двухчастотном режиме. В расчетах длина волны света выбиралась равной 1 мкм, а полная ширина преобразователя с РДС составляла 1.4 см. Результаты моделирования представлены на рис. 3. Белыми пунктирными линиями на графиках показано рабочее угловое поле зрения АО-фильтра размером 6°×6° (внутри кристалла), выбранное в соответствии с симметрией и шириной ДПФ ячейки при $f = f_w$.

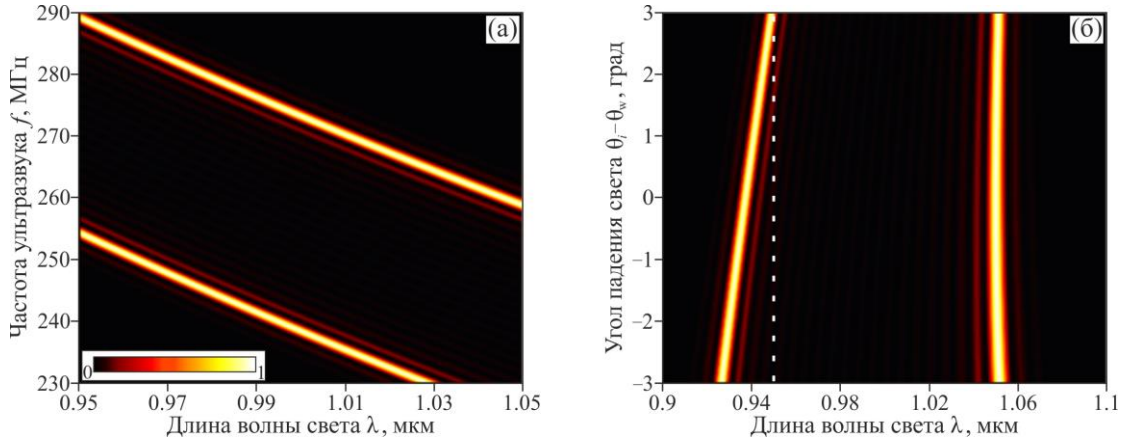


Рис. 2. Частотно-спектральные (а) и спектрально-угловые (б) характеристики широкоапертурной дифракции света в срезе $\chi = 7.2°$ плоскости *XY* в акустическом поле PPLN-пьезопреобразователя из $N = 10$ периодов.

Как следует из графика на рис. 3 ,а, ДПФ на этой частоте имеет форму идеального круга, при этом угловая апертура дифракции составляет 2.4°. Изменение формы ДПФ, происходящее при добавлении к радиосигналу с $f = 273.3$ МГц второго сигнала с более высокой частотой $f = f_2$, иллюстрирует рис. 3 ,б. Частота $f_2 = 273.9$ МГц здесь выбрана равной рабочей частоте f_w широкоапертурной геометрии для света с $\lambda = 998$ нм. Можно видеть, что в этом случае область ДПФ, отвечающая частоте f_2, располагается целиком снаружи рабочего углового поля. Это означает, что искомый минимальный интервал между компонентами двухцветного поля для предлагаемого АО-формирователя пучка на кристалле α-HIO_3 оказывается немного меньшим 2 нм. При этом ширина частотного диапазона Δf, доступного для каждой длины волны с $0.95 < \lambda < 1.05$ мкм, составляет порядка 350 кГц. Как показали расчеты, смещение топологического центра ДПФ в пределах указанного диапазона Δf не превышает 0.15°, тогда как в ранее упомянутых серийных парателлуритных АО-фильтрах с

углом среза $\chi < 12°$ это смещение (при той же ширине преобразователя) оказывается как минимум в 4 раза больше.

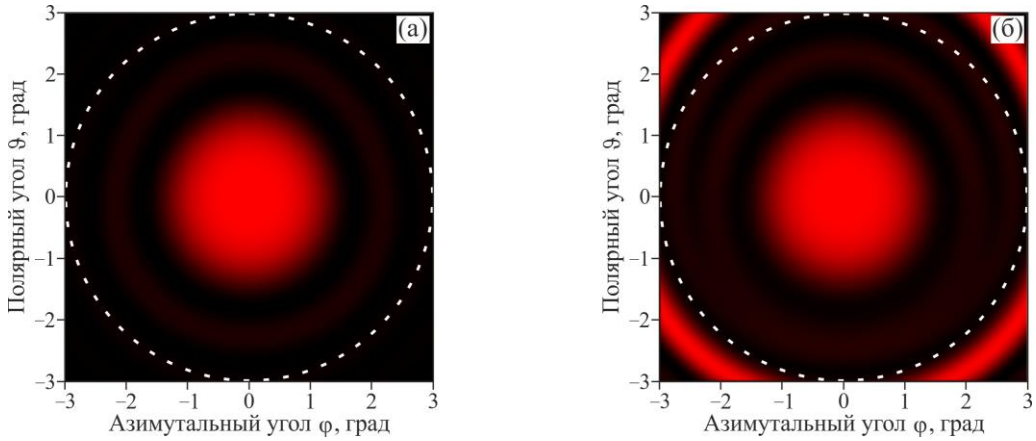


Рис. 3. Двумерные угловые характеристики широкоапертурной дифракции света с λ = 1 мкм в АО-ячейке с PPLN-пьезопреобразователем из N = 100 периодов, работающей в одночастотном (а) и двухчастотном (б) режиме.

Заключение

В работе исследованы характеристики режима широкоапертурной АО-дифракции с симметричной кольцевой двумерной передаточной функцией в двуосном кристалле йодноватой кислоты. Найден оптимальный период структуры PPLN-преобразователя, минимизирующий дисперсию угла Брэгга выбранной геометрии в диапазоне длин волн от 0.95 до 1.05 мкм. Рассчитаны одноцветные и двухцветные передаточные функции АО-ячейки при использовании двухчастотного управляющего радиосигнала. Доказана перспективность использования такой АО-ячейки в системах двухцветной оптической ловушки с интервалом между спектральными компонентами от 2 до 100 нм.

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова.

Список литературы

1. *Alpmann C. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2012. **100**, N 11. P. 111101.
2. *Xu P. et al.* // Opt. Lett. 2010. **35**, N 13. P. 2164.
3. *Yushkov K.B. et al.* // J. Opt. 2023. **25**, N 1. P. 014002.
4. *He X. et al.* // Opt. Express. 2012. **30**, N 4. P. 3711.
5. *Kestler G. et al.* // PRX Quantum. 2023. **4**. P. 0403080O.
6. *Obydennov D. et al.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2024. **2822**. P. 012167.
7. *Kupreychik M.I. et al.* // Proc. 2022 WECONF, 2022. P. 9803450.
8. *Naito H.*, *Inaba H.* // *Optoelectron.* 1972. **4**, N 3. P. 335.
9. *Molchanov V.Ya.* // Acta Physica Slovaca. 1996. **46**, N 6. P. 715.

УДК: 534.221, 535.421, 535.012.21, 534.8.081.7, 534-16. DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39620

Влияние формы пьезоэлектрического преобразователя на структуру акустического пучка в акустооптическом кристалле

С.Н. Манцевич[1,a]

[1] *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, Россия,119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.*
E-mail: [a] *mantsevichsn@my.msu.ru*

Одним из важных применений акустооптических (АО) устройств является их использование в системах спектральной фильтрации изображений, имеющее ряд особенностей. К ним можно отнести спектральный дрейф дифрагированного светового пучка, искажения изображения, вносимые АО ячейкой, и зависимость интенсивности дифрагированного светового излучения от мощности акустического пучка. Последнее приводит к тому, что пространственное распределение интенсивности в дифрагированном световом пучке начинает определяться не только параметрами изображения, но и структурой акустического поля в АО ячейке, которая, как правило, не является однородной. Таким образом, одновременно со спектральной фильтрацией происходит и визуализация акустического поля, что значительно ухудшает качество изображения. Кроме того, изменение рабочей частоты АО фильтра, требуемое для перестройки по спектру светового излучения, сопровождается изменением структуры акустического пучка в силу изменения его исходной дифракционной расходимости. Поэтому актуальной проблемой является создание в АО ячейках таких акустических полей, которые не будут обладать значительными неоднородностями структуры. Данную задачу можно решить применением аподизированных пьезопреобразователей или преобразователей сложной формы. В данной работе рассмотрена возможность использования набора прямоугольных преобразователей различной высоты.

Ключевые слова: спектральная фильтрация изображений, акустооптическая дифракция, ультразвуковые пучки, пьезопреобразователь

Piezoelectric transducer shape influence on the acoustic beam structure in acousto-optic crystal

S.N. Mantsevich[1,a]

[1] *M.V. Lomonosov Moscow State University, Physics department, Moscow 119991, Russia.*
E-mail: [a] *mantsevichsn@my.msu.ru*

Spectral filtering of images is one of the important applications of acousto-optic (AO)

devices, which presents a number of challenges. These include the spectral drift of the diffracted light beam, image distortions introduced by the AO cell, and the dependence of the diffracted light intensity on the acoustic beam power. The latter leads to the spatial intensity variations in the diffracted light beam being determined not only by the image parameters but also by the structure of the acoustic field in the AO cell, which is typically non-uniform. Thus, spectral filtering is accompanied by visualization of the acoustic field, significantly degrading image quality. Furthermore, changing the AO filter's operating frequency, required for spectral tuning of the diffracted light, alters the structure of the acoustic beam due to changes in its initial diffraction divergence. Therefore, a pressing issue is the creation of acoustic fields in AO cells that do not exhibit significant structural inhomogeneities. This problem can be solved by using apodized piezoelectric transducers or transducers with complex shapes. This paper examines the possibility of applying a set of rectangular transducers of varying heights for such purpose.

Keywords: spectral filtration, acousto-optic diffraction, ultrasound beams, piezotransducer

PACS: 78.20.Hp

Введение

Акустооптическое взаимодействие – эффект дифракции светового излучения на ультразвуковой волне, возбуждаемой в оптически прозрачной среде, широко используется для создания устройств управления различными характеристиками светового излучения [1].

Одним из важных применений АО устройств является спектральная фильтрация оптического излучения, реализуемая с помощью перестраиваемых АО фильтров. В этих устройствах длина волны дифрагированного светового излучения определяется частотой ультразвука, возбуждаемого в АО кристалле, а спектр оптического излучения регистрируется последовательно при перестройке рабочей частоты в некотором диапазоне. Спектральное разрешение таких устройств определяется свойствами материала, из которого они изготовлены, геометрией АО дифракции и размерами (длиной) области АО взаимодействия.

Для создания АО фильтров, чаще всего используется так называемая широкоугольная геометрия АО дифракции [2]. Существование такой геометрии позволяет создавать на основе АОПФ не только точечные спектрометры, но и изображающие спектрометры, обладающие достаточно большим полем зрения [3]. Результатом работы изображающего спектрометра являются изображения исследуемого объекта, полученные на различных длинах волн светового излучения и формирующие гиперспектральный куб данных, позволяющий для каждой точки изображения построить спектральную зависимость коэффициента отражения.

Для корректной работы АО видеоспектрометра необходимо чтобы все световые лучи, формирующие изображение исследуемого объекта дифрагировали в АО фильтре с одинаковой интенсивностью, однако, на практике это невозможно. Причиной этого является неоднородность акустического поля внутри АО кристалла, возникающая вследствие дифракционной расходимости ультразвукового пучка за счет ограниченности линейных размеров пьезопреобразователя и действия акустической анизотропии среды взаимодействия [4].

На сегодняшний день основным материалом, используемым для создания АО фильтров, является кристалл парателлурита [5], обладающий исключительной анизотропией акустических характеристик для медленной акустической моды, как раз таки применяемой для реализации АО дифракции. Действие анизотропии приводит перераспределению акустической энергии внутри пучка и к увеличению его неоднородности. При этом дальняя зона дифракции пучка на собственной апертуре существенно приближается к плоскости пьезопреобразователя [4]. Поэтому мощность ультразвука в области ограниченной размерами светового пучка может существенно меняться, следовательно, свет будет дифрагировать с различной эффективностью и, фактически, распределение интенсивности в его поперечном сечении на выходе будет определяться интегральной мощностью акустического поля вдоль направления распространения каждого из лучей.

Важно, что исходная дифракционная расходимость акустического пучка зависит от частоты ультразвука, которая в процессе работы АО фильтра может изменяться примерно в 4 раза. Таким образом, структура акустического пучка и распределение мощности вдоль световых лучей будет меняться при перестройке частоты, внося изменения в данные, содержащиеся в гиперкубе. Влияние структуры акустического поля можно устранить, проведя калибровки АО спектрометра с помощью ламбертовского экрана, регистрируя распределения интенсивности на матрице фотоприемного устройства при различных частотах ультразвука. Однако при использовании АО видеоспектрометров в полевых условиях эффективность подобных калибровок может сильно снижаться вследствие изменения условий освещения и геометрии наблюдения.

Таким образом, возникает задача возбуждения в АО кристаллах волновых пучков с такой пространственной структурой, которая позволила бы достичь наиболее однородного распределения интенсивности светового излучения в поперечном сечении дифрагированного оптического пучка. Вторым аспектом данной задачи является повышение эффективности АО дифракции за счет большей однородности акустического пучка, которое приводит к снижению управляющей мощности.

В данной работе данная задача решается за счет оригинального подхода к аподизации пьезопреобразователя АО ячейки.

1 Процедура аподизации

Применение аподизации широко распространено как метод борьбы с проявлениями дифракции волновых пучков на собственной апертуре [6]. Аподизация применяется как в оптических, так и в акустических системах и заключается в создании такого пространственного распределения амплитуды и фазы в поперечном сечении волнового пучка, при котором он бы распространялся в пространстве без проявления дифракционных эффектов.

Возбуждение ультразвуковых пучков в АО устройствах имеет ряд особенностей, связанных с высокими рабочими частотами и малыми размерами самих АО ячеек и их пьезопреобразователей. Поэтому единственным применяемым на сегодняшний день методом аподизации являются различные варианты сегментирования пьезопреобразователя [7,8] или вариации его общей топологии [9,10].

Также отметим, что основной целью большинства исследований по данному вопросу является улучшение формы аппаратной функции АО устройств или повышение эффективности АО дифракции за счет перераспределения акустической энергии в ультразвуковом пучке [7-10].

Поскольку в первом приближении форма аппаратной функции определяется как результат преобразования Фурье от пространственного распределения амплитуды в поперечном сечении акустического пучка световым в плоскости АО взаимодействия, то аподизация в АО устройствах направлена на создание пространственного распределения амплитуды, близкого к функции Гаусса или других функций, Фурье образы которых имеют боковые максимумы малой высоты. Добиться желаемого распределения амплитуды в плоскости пьезопреобразователя можно двумя способами – либо за счет деления пьезопреобразователя на равные секции и подачи на них напряжения различной величины (наибольшее напряжение подается на центральную секцию), либо делением пьезопреобразователя на секции разной длины и подачи на них одинакового напряжения [8]. Во втором случае центральная секция должна иметь минимальную длину, а крайние – максимальную.

Оба рассмотренных варианта имеют свои недостатки с точки зрения практической реализации. В первом случае возникают проблемы с получением различных величин напряжения, подаваемого на секции пьезопреобразователя, а во втором – с согласованием электрических импедансов секций, поскольку их статические емкости существенно различаются.

Аподизация за счет топологии пьезопреобразователя (простейшей формой преобразователя в данном случае является ромб) основана на том, для различных частей светового пучка реализуется различная длина АО взаимодействия [9]. В данном случае возникают аналогичные проблемы с согласованием пьезопреобразователя. Однако применение подобных пьезопреобразователей в АО модуляторах, использующих акустически изотропные среды или среды с малой анизотропией, действительно позволяет поднять эффективность АО взаимодействия [10].

Отдельно отметим оригинальный подход с созданием псевдослучайного пьезопреобразователя с гауссовой функцией распределения, предложенный в работе [11], позволивший добиться существенного повышения однородности интенсивности светового излучения в дифрагированном световом пучке. Но формирование верхнего электрода в данном случае также является достаточно сложной процедурой, а аподизация ,была реализована только в плоскости АО дифракции.

Общим недостатком перечисленных работ, с точки зрения применения полученных результатов для создания АО видеоспектрометров, является следующее – предложенные методик сегментирования пьезопреобразователя реализуют аподизацию только в плоскости АО дифракции, при этом акустическая анизотропия парателлурита в ортогональной плоскости существенно больше и сильнее влияет на структуру акустического поля [4,12]. Например, для угла среза кристалла парателлурита 5° коэффициент акустической анизотропии в плоскости дифракции равен 5.8, а в ортогональной – 47.5, при угле среза 10° - 2.3 и 37.4 соответственно, а при угле среза 15° - 1.3 и 27.5 (в акустически изотропной среде коэффициент анизотропии равен 1).

Расчеты структуры акустических полей для пьезопреобразователей со сложной топологией выполнены только для акустически анизотропных сред [10]. Ни одна из работ, кроме [11] (в ней отсутствует моделирование акустического поля) не сфокусирована на вопросе создания акустического пучка, обеспечивающего максимальную однородность интенсивности светового поля в поперечном сечении дифрагированного светового пучка.

В данной работе расчеты структур акустических полей выполнены с учетом акустической анизотропии среды (кристалл парателлурита), с помощью ранее разработанного метода, основанного на анализе влияния акустической анизотропии среды на пространственный спектр пучка [4,12]. Расчеты проведены для пьезопреобразователей с прямоугольными сегментами различной формы.

На основе анализа пространственного спектра пучков определены соотношения между размерами секций пьезопреобразователя, позволяющие получить наиболее однородное суммарное распределение мощности ультразвука в области пересечения со световым пучком.

Расчеты выполнены для АО фильтров с типичными значениями угла среза (направления ориентации волнового вектора осевой компоненты пространственного спектра пучка относительно кристаллографической оси [110] в плоскости (1-10)) в диапазоне от 7° до 15° и частот ультразвука от 25 до 100 МГц.

Заключение

В работе рассмотрена возможность повышения однородности распределения интенсивности в поперечном сечении дифрагированного светового пучка за счет специфического подхода к аподизации пьезоэлектрического преобразователя АО фильтра. Данный подход заключается в том, что соотношения размеров секций определяются в соответствии с параметрами пространственного спектра каждой из секций, таким образом, чтобы результирующий спектр не содержал низкочастотных боковых максимумов. Рассмотренный подход позволяет использовать меньшее количество секций, по сравнению с традиционными вариантами и обеспечить кратные значения их статических емкостей. Моделирование акустических полей и результатов АО взаимодействия выполнено для кристалла парателлурита в широком диапазоне углов среза АО ячейки и частот ультразвука.

Показана эффективность данного подхода, особенно для срезов с высокой акустической анизотропией и относительно малых частот ультразвука.

Работа выполнена в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова.

Список литературы

1. *Goutzoulis A., Pape D.* Design and Fabrication of Acousto-Optic Devices. Marcel Dekker, 1994.
2. *Chang I.C.* // Appl. Phys. Lett. 1974. **25**. P. 370–372.
3. *Korablev O.I., Belyaev D.A., Dobrolenskiy Y., Trokhimovskiy A.Y., Kalinnikov Y.* // Appl. Opt. 2018. **57**. P. C103–C119.
4. *Балакший В.И., Манцевич С.Н.* // Акустический журнал. 2012. **58**. С. 600-609.
5. *Ohmachi Y., Uchida N., Niizeki N.* // J. Acoust. Soc. Am. 1972. **51**. P. 164–168.
6. *Wang H., Sheppard C.J.R., Ravi K., Ho S.T., Vienne G.* // Laser Photonics Rev. 2012. **6**. P. 354-392.
7. *Pieper R., Korpel A., Hereman W.* // J. Opt. Soc. Am. A. 1986. **3**. P. 1608-1619.
8. *Filatova E.Yu., Parygin V.N.* // J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 2001. **3**. P. S40-S45.
9. *Волошинов В.Б., Князев Г.А.* // Журнал технической физики. 2003. 73. С. 118-122.
10. *Liang L., et al.,* // IEEE Photonics Technology Letters. 2024. **36**. P. 1025-1028.
11. *Pannell C.N., Ward J.D., et. al.* // Proc. SPIE. 2015. **9369**. 936906.
12. *Ermakov A.A., Balakshy V.I., Mantsevich S.N.* // Physics of Wave Phenomena. 2013. **21**. P. 314-319.

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39621

Новые возможности акустооптики для управления параметрами рентгеновского излучения

Я.А. Элиович[1], В.А. Коржов[1], А.В. Таргонский[1], Ю.В. Писаревский[1], А.Е. Благов[1]

[1)] НИЦ «Курчатовский институт, г. Москва;

E-mail: yan.eliovich@gmail.com

Аннотация. При проведении исследований методами на основе дифракции рентгеновского излучения как правило необходимо осуществлять изменение углового положения рентгеновского пучка. Обычно это происходит с помощью гониометрических систем, которые серьезно ограничены в быстродействии. Однако существует подход, позволяющий реализовать управление параметрами рентгеновского пучка с помощью акустических волн, который относится к области так называемой рентгеноакустики. Данный подход позволяет осуществить классические методики на основе рентгеновской дифракции и спектроскопии, но с большим потенциальным быстродействием. Для его дальнейшего развития требуется детальное исследование рентгеноакустического взаимодействия в монокристаллах.

Ключевые слова: кристаллические резонаторы, рентгеноакустическое взаимодействие, рентгеновская топография, визуализация кривой качания

NEW CAPABILITIES OF ACOUSTOOPTICS FOR CONTROLLING X-RAY BEAM PARAMETERS

I.A. Eliovich[1], V.A. Korzhov[1], A.V. Targonskii[1], Yu.V. Pisarevskii[1], A.E. Blagov[1]

[1)] NRC “Kurchatov institute”, Moscow, Russia

E-mail: yan.eliovich@gmail.com

Abstract. When conducting research using X-ray diffraction-based methods, it is usually necessary to change the angular position of the X-ray beam. This is usually done using goniometric systems, which are seriously limited in speed. However, there is an approach that allows for the control of X-ray beam parameters using acoustic waves, which belongs to the field of so-called X-ray acoustics. This approach enables the implementation of classical X-ray diffraction and spectroscopy techniques, but with potentially greater speed. Further development of this approach requires a detailed study of X-ray acoustic interaction in single crystals.

Keywords: crystalline resonators, X-ray acoustic interaction, X-ray topography, rocking curve visualization

Введение

Исследовательские методы на основе рентгеновского излучения занимают ключевую позицию в современной науке благодаря возможности получения уникальной информации о структуре изучаемого вещества. Данные методы позволяют исследовать вещество на атомном уровне, их развитие привело к появлению подходов для изучения структурных изменений, возникающих, например, при внешнем воздействии на исследуемый образец. Это стало возможным благодаря одновременному развитию трех основных направлений: новых источников рентгеновского и синхротронного излучения (РИ и СИ) с большей интенсивностью и особой структурой пучка, современных детекторных систем и новых подходов к вариации параметров рентгеновского пучка в процессе проведения исследований. К последнему направлению относится и рентгеноакустика: с помощью акустической волны можно управлять параметром решетки кристалла, а значит и дифрагированным таким кристаллом рентгеновским пучком.

Рентгеноакустические резонаторы продольных колебаний

Впервые концепция применения низкочастотной ультразвуковой (УЗ) модуляции для контролируемой вариации параметра решетки кристалла была предложена в работе М.В. Ковальчука и В. Л. Носика [1]. В работе было показано, что при низкочастотном УЗ в кристалле создаются деформации, которые аналогичны случаю изогнутого кристалла. При этом переменная деформация, возникающая из-за воздействия стоячей УЗ волны, может динамически варьировать параметры дифрагированного рентгеновского излучения [2-3].

В дальнейшем это направление получило развитие в работах М.В. Ковальчука, Ю.В. Писаревского и А.Е. Благова в Институте Кристаллографии им. А.В. Шубникова РАН. Были предложены специальные элементы – рентгеноакустические (РА) кристаллические резонаторы продольных колебаний, которые использовались для быстрой вариации параметров дифрагированного ими РИ.

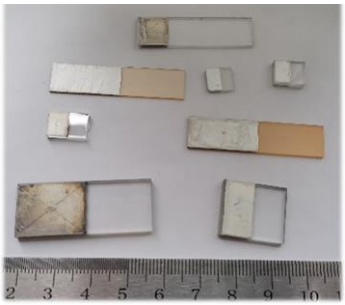
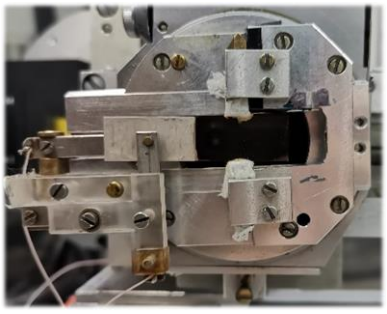
а)  б) 

Рис. 1. Фотографии рентгеноакустических резонаторов продольных колебаний: (а) различные резонаторы из лангасита, кварца и парателлурита; (б) пример установки РА резонатора в специальный держатель

На их основе был предложен целый ряд исследовательских методик – в том числе для регистрации кривых дифракционного отражения (КДО) без использования гониометрических систем [4], а также для управления спектром РИ [5].

Одной из основных функциональных характеристик таких резонаторов является резонансная частота, соответствующая возникновению стоячей акустической волны и определяющая скорость вариации параметра решетки, а значит и дифрагированного элементом РИ. Для предложенных элементов она лежит в диапазоне 100-200 кГц, что позволяет осуществлять однократное «сканирование» за времена порядка единиц микросекунд при условии достаточной интенсивности источника РИ. Интеграция такого элемента в схему рентгеновского эксперимента позволяет варьировать параметры РИ непосредственно в процессе проведения измерений. За эту особенность соответствующие элементы получили название адаптивных элементов рентгеновской оптики (АЭРО). В дальнейшем к ним добавились разработанные в Институте Кристаллографии изгибные адаптивные элементы, которые используют принцип управляемой пьезоподвижки для быстрого изменения углового положения рентгеновского дифракционного элемента [6].

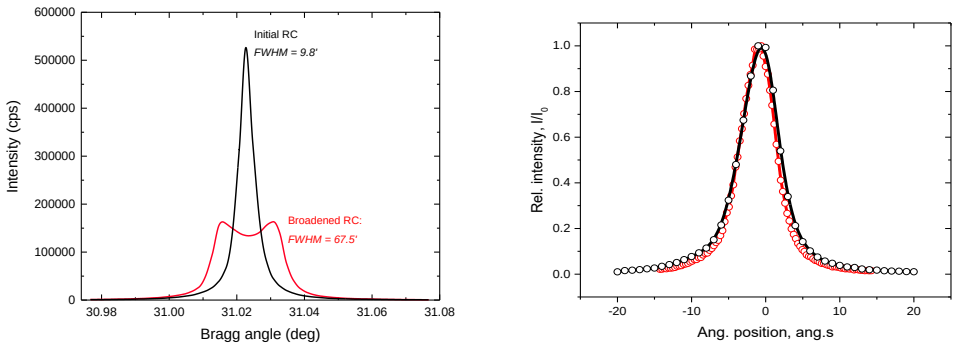


Рис. 2. Пример уширения КДО кристалла-резонатора в условиях УЗ колебаний и демонстрация диапазона сканирования КДО с помощью УЗ модуляции параметра решетки

К настоящему моменту адаптивные элементы на основе рентгеноакустического взаимодействия были многократно протестированы на лабораторных и синхротронных источниках, включая источники КИСИ-Курчатов и PETRAIII, где доказали высокую эффективность и быстродействие. В частности, помимо методик быстрого управления угловыми и спектральными характеристиками излучения была показана возможность их применения для выявления запрещенных рентгеновских рефлексов [7].

К недостаткам адаптивных элементов можно отнести ограниченность диапазона вариации параметра решетки с помощью акустической волны, что связанно в первую очередь с прочностью используемых материалов. Даже прочные кристаллы кварца, которые использовались для создания рабочих прототипов, обеспечивали угловую перестройку в диапазоне не более 100-200 угловых секунд, зачастую недостаточном для полноценного

исследования эволюции структурных изменений, особенно в случае дефектных кристаллов. Значения управляющих напряжений при этом могли превышать сотни вольт, что делало применение таких элементов небезопасным.

Новые подходы к исследованию рентгеноакустических резонаторов

Актуальной является задача разработки методик исследования резонаторов продольных колебаний в условиях возбуждения ультразвуковых воздействий, в том числе с целью поиска новых перспективных материалов для изготовления резонаторов или в рамках диагностики поведения готовых резонаторов в условиях, приближенных к реальным условиям эксплуатации.

Для того, чтобы РА резонатор не вносил искажения во внутреннюю структуру дифрагированного пучка, необходимо, чтобы пучок отражался от области с однородной деформацией. Таким образом, возникает задача визуализации деформаций кристаллической решетки, возникающих при УЗ воздействии, для решения которой хорошо подходят рентгенодифракционные методы исследования, в особенности – метод визуализации кривой качания [8, 9], обладающий высокой чувствительностью (до 10^{-14} м) и возможностью исследования относительно больших площадей образца (до нескольких см).

Визуализация кривой качания колеблющихся рентгеноакустических резонаторов

Пространственное распределение деформаций кристаллической решетки РА резонатора

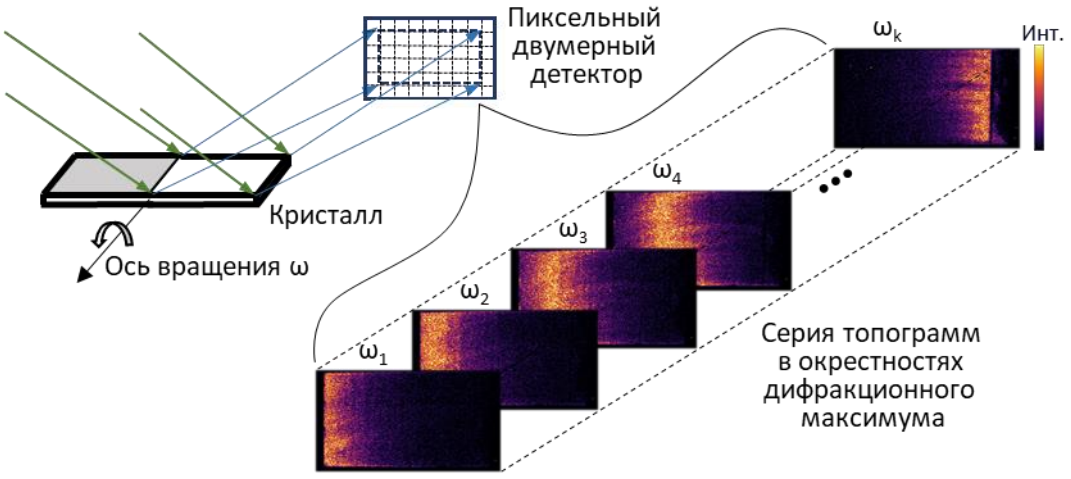


Рис. 3. Схематичное изображение исследуемого образца, схемы метода визуализации кривой качания и получаемых исходных данных

при воздействии ультразвука, соответствующего возбуждению продольной моды колебаний, напрямую определяет его функциональные возможности по управлению параметрами рентгеновского пучка. Для демонстрации эффективности тестирования РА резонаторов методом визуализации кривой качания в работе представлены примеры исследований продольных АЭРО на основе кристаллов лангасита (LGS), изготовленных в виде тонких

прямоугольных пластинок X-среза. Эксперименты проводись на энергии E(MoK_{a1}) = 17,4798 кэВ, ширина падающего на образец пучка составляла ~ 8 мм. Топограммы регистрировались на пиксельный двумерный детектор с размером пикселя 55 мкм^2.

Пучок засвечивал свободную от электродов половину образца. В ходе измерений осуществлялось ω-сканирование, анализировались атомные плоскости (440) в геометрии на отражение, при каждой угловой отстройке образца записывалась отдельная топограмма (рис. 3). Полученные топограммы «попиксельно» обрабатывались для составления карт распределения основных параметров кривой качания.

Анализ деформаций кристаллической решетки осуществлялся на основе карт полуширины кривой качания, так как данный параметр наиболее информативен при соответствующем виде ультразвука [10].

Примеры результатов представлены на рисунке 4.

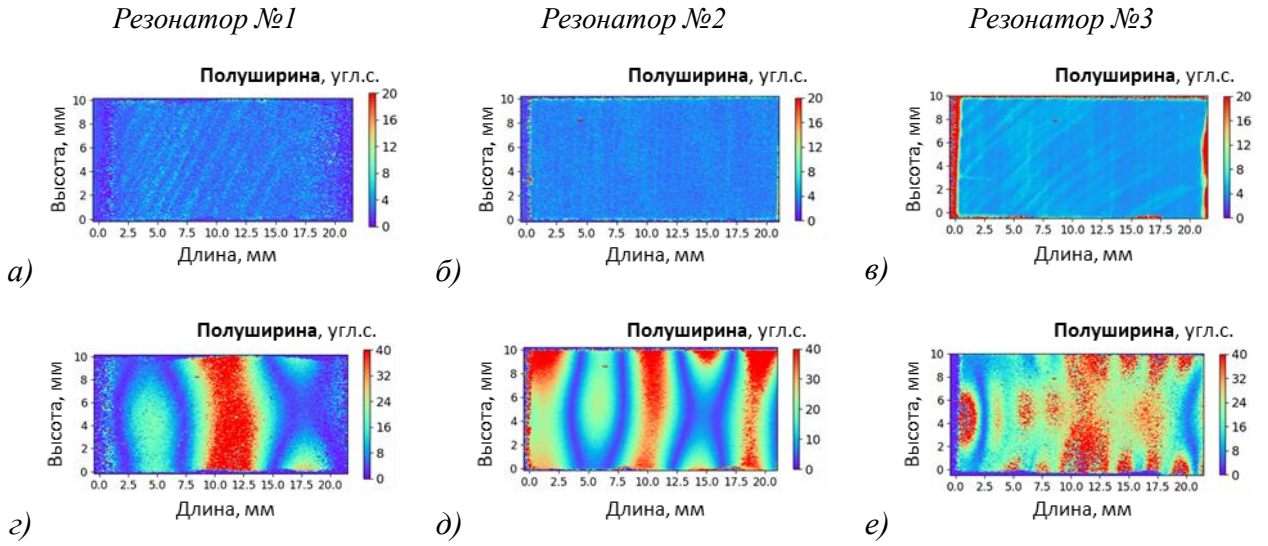


Рис. 4. Карты полуширины кристаллов LGS без воздействия (а, б, в) и при УЗ с $f_{рез} \approx 96$ кГц, соответствующей возбуждению колебаний продольной моды первой гармоники (г, д, е)

Без УЗ воздействия в кристаллах прослеживается наклонные полосы роста (рис. 4а и д). При воздействии УЗ наблюдается четкий контраст полуширины. Яркие области с большим значением полуширины соответствуют пучностям стоячих волн (максимальная деформация), темные области – узлам (минимальная деформация). Для резонаторов №1 и №2 полуширина в узловых областях соответствует полуширине при отсутствии УЗ, т.е. кристалл в них действительно не колеблется. Пучности и узлы имеют преимущественно вертикальное расположение. Несмотря на то, что на образцы подавался УЗ первой гармоники, на всех картах полуширины прослеживается несколько пучностей. В резонаторе №1 порядка трех стоячих волн вдоль длинны, в резонаторе №2 порядка 5, в резонаторе №3 не менее 7. Множество

стоячих волн обусловлено интерференцией разных акустических мод [3]. «Паразитные» моды возникают из-за переотражения от границ кристалла, которые могут, например, иметь существенные отклонения от плоскопараллельности. По полученным данным можно однозначно сделать выводы о пригодности исследуемых кристаллов-резонаторов для работы в качестве адаптивных элементов рентгеновской оптики: наиболее подходящим является резонатор №1, так как в нем область пучности (центральной) по сравнению с другими образцами имеет наибольший размер, а значит пучок при дифракции от данной области будет претерпевать меньше искажений.

Заключение и выводы

Применение деформаций кристаллического резонатора, вызванных акустической волной, для управления параметрами рентгеновского излучения является перспективным подходом, позволяющим значительно повысить быстродействие классических методик на основе дифракции рентгеновского излучения. Показано, что применение РА резонаторов в качестве управляемых элементов рентгенодифракционного эксперимента дает возможность реализовать быструю перестройку параметров дифрагированного пучка, что может использоваться для быстрого сканирования КДО или спектров исследуемых образцов.

Предложен новый подход к диагностике РА резонаторов на основе метода визуализации кривой качания, который позволяет проводить прецизионный и локальный анализ деформаций решетки при упругих колебаниях. Приведены примеры исследований кристаллических резонаторов из лангасита, локализованы области пучностей и узлов стоячих волн при воздействии УЗ, соответствующего возбуждению колебаний продольной моды. Показано, что предложенный метод позволяет эффективно оценивать наличие «паразитных» мод в исследуемых образцах, влияющих на их функциональные характеристики, а значит и проводить оценку пригодности резонаторов для проведения исследований.

Работа выполнена в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

Список литературы

[1] В.Л. Носик, М.В. Ковальчук. Рентгеновские элементы, основанные на колеблющихся кристаллах. // Поверхность. 2000. №1. С. 91-98.

[2] А.Е. Благов, М.В. Ковальчук, В.Г. Кон и др. // ЖЭТФ. 2005. Т. 128. № 5. С. 893.

[3] А.Е. Благов, А.Н. Даринский, М.В. Ковальчук и др. // Акустический журнал. 2013. Т. 59. № 5. С. 561.

[4] А.Е. Благов, Ю.В. Писаревский, М.В. Ковальчук // Кристаллография. 2016. Т. 61. № 1. С. 10.

[5] А.Е. Благов, Ю.В. Писаревский, П.А. Просеков, А.В. Таргонский, Я.А. Элиович, А.И. Проценко, М.В. Ковальчук // Кристаллография. 2017. Т. 62. № 6. С. 870-875.

[6] Y. A. Eliovich, A. E. Blagov, A. G. Kulikov, A. V. Targonskii, Yu. V. Pisarevsky, A. I. Protsenko, V. I. Akkuratov, V. A. Korzhov, I. I. Petrov, I. V. Kubasov, A. M. Kislyuk, A. V. Turutin, M. D. Malinkovich, Yu. N. Parkhomenko, S. V. Salikhov, A. S. Machikhin, M. V. Kovalchuk. Crystallography Reports, 2022, Vol. 67, No. 7, pp. 1041–1060.

[7] Я.А. Элиович, Е.Н. Овчинникова, К.А. Козловская, М. Жорнак, Т. Вайгель, К. Лудт, А.Е. Благов, В.Е. Дмитриенко, Ю.В. Писаревский, М.В. Ковальчук. Письма в ЖЭТФ, том 115, вып.8, с. 492–497. doi.org/10.31857/S1234567822080055

[8] Kaloyan, A. A. Methods of angular scanning in X-ray imaging and topography / A. A. Kaloyan, E. S. Kovalenko, K. M. Podurets // Physics Procedia. – 2016.
– Vol. 84. – P. 355-359.

[9] Buffiere, J. Y. Hard X-ray synchrotron imaging techniques and applications /
J. Y. Buffiere, J. Baruchel // Synchrotron Radiation: Basics, Methods and Applications. – Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014.
– P. 389-408.

[10] Новые возможности для анализа деформаций колеблющихся кристаллов с помощью рентгеновской визуализации кривой качания. Элиович Я.А., Петров И.И., Коржов В.А., Аккуратов В.И., Писаревский Ю.В. Письма в ЖЭТФ, том 120, вып. 5, 2024. с. 377 – 381

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39622

Акустооптическое взаимодействие в структурах, содержащих слои

Г.А. Князев[1,a)]

[1] *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет. Москва, 119991, Россия*

E-mail: [a)] g_knyazev@mail.ru

Аннотация. Рассматривается механизм усиления эффективности акустооптического взаимодействия в слоистых структурах, возмущенных ультразвуком. В качестве такой структуры рассмотрена структура содержащая тонкий слой теллура. При этом предлагается ультразвук возбуждать непосредственно в данном слое. Благодаря высокому акустооптическому качеству теллура можно получить высокую эффективность взаимодействия даже при небольшой толщине слоя. Также рассматривается возможность увеличить эффективность акустооптической модуляции за счет резонансных свойств структуры.

Ключевые слова: акустооптика, слоистые структуры, дифракция света, поверхностные оптические моды, инфракрасное излучение.

Acousto-optical interaction in structures containing layers

G.A. Knyazev[1,a)]

[1] *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics. Moscow, 119991, Russia E-mail:* [a)] g_knyazev@mail.ru

A mechanism for enhancing the efficiency of acousto-optic interaction in layered structures excited by ultrasound is considered. A structure containing a thin tellurium layer is considered for this purpose. It is proposed to excite ultrasound directly within this layer. Due to the high acousto-optic quality of tellurium, high interaction efficiency can be achieved even with a thin layer thickness. The possibility of increasing the efficiency of acousto-optic modulation by exploiting the resonant properties of the structure is also explored.

Keywords: acousto-optics, layered structures, light diffraction, surface optical modes, infrared radiation.

Введение

В последнее время, в связи с развитием электроники и тенденцией к миниатюризации оптоэлектронных систем, акустооптические устройства перестали удовлетворять требованиям компактности и быстродействия [1, 2]. Миниатюризация

может быть достигнута в планарных акустооптических системах, однако проблема низкого быстродействия (медленнее 1 нс), связанная с высоким затуханием ультразвука на гигагерцовых частотах, не решается при использовании классических схем взаимодействия в однородных средах. Длина акустооптического взаимодействия на частотах выше нескольких ГГц настолько мала, что эффективное акустооптическое взаимодействие невозможно. Более того, эта проблема острее возникает в среднем и дальнем инфракрасном диапазоне. В связи с тем, что эффективность акустооптического взаимодействия квадратично падает с увеличением длины волны, до сих пор диапазон длин волн более 3–5 мкм остается малоисследованным [3, 4].

Поэтому одной из фундаментальных задач акустооптики является поиск новых материалов и видов акустооптического взаимодействия, которые позволили бы осуществлять ультрабыструю (более 1 ГГц) модуляцию оптического излучения, а также повысить эффективность акустооптического взаимодействия и уменьшить характерные размеры устройств до 1 мм и менее [5]. Одним из перспективных методов повышения эффективности акустооптического взаимодействия является использование многослойных и плазмонных структур, в которых могут возбуждаться поверхностные электромагнитные волны. Известно, что использование таких структур обеспечивает усиление взаимодействия света с веществом и проявляет высокую чувствительность к параметрам структуры и света, что приводит к увеличению оптических эффектов (нелинейно-оптических, магнитооптических и др.) [6–9]. Аналогичным образом может быть получено усиление акустооптического взаимодействия [10, 11]. При этом могут быть использованы как плазмонные структуры, добротность оптических резонансов в которых растет с увеличением длины волны, так и полностью диэлектрические многослойные структуры с фотонными кристаллами, также обладающие высокой добротностью.

1 Дифракция света на слоистой структуре, возмущенной ультразвуком

Ранее при исследовании акустооптического взаимодействия в монокристалле теллура было установлено, что основанная проблема данного материала – чрезвычайно сильное поглощение необыкновенной волны [3]. Одним из решений данной проблемы может быть использование акустооптической ячейки с тонким слоем (пластиной) монокристалла теллура размещенной между двумя призмами из германия как показано на рисунке 1. В таком случае длина оптического пути в материале с сильным поглощением будет существенно уменьшена. В данной работе мы рассмотрим пример такой системы, когда слой теллура имеет размеры несколько десятков микрон. При этом можно использовать для анализа методику, аналогичную работам [7,11]. Более того, можно рассмотреть немного измененную задачу – убрать одну призму германия, тогда получим систему Ge-Te-воздух. В такой структуре возможно существование волноводной оптической моды и мод типа Фабри-Перо. Для возбуждения волноводной моды необходимо равенство проекции волнового вектора падающей волны света на волновой вектор волноводной моды. Такое требование не выполняется. Единственный вариант

возбуждение такой моды – взаимодействие с ультразвуком. Однако, анализ показывает, что для этого требуются слишком высокие частоты ультразвука. Также это требование ограничивает рабочий диапазон частот. Поэтому целесообразно рассмотреть именно моды типа Фабри-Перо.

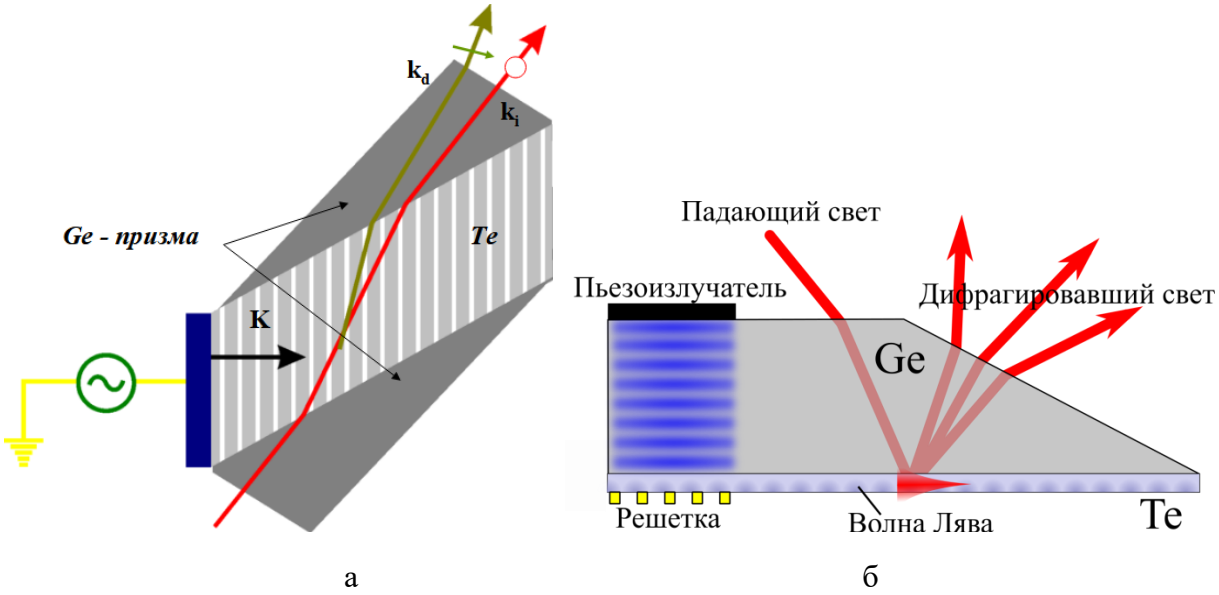


Рис. 1: Схема акустооптического фильтра на теллуре (а) и структуры Ge-Te-воздух (б)

Анализ электромагнитных полей на границе слоев показывает, что коэффициент отражения N-слойной структуры $R = \xi^2$ может быть рассчитан по следующей формуле:

$$\xi_j = \frac{\eta_j + \chi_{j+1}}{1 + \eta_j \chi_{j+1}}, \quad (1)$$

$$\chi_j = \xi_j \exp\left(-2ik_{j-1,z} d_{j-1}\right). \quad (2)$$

В уравнении (1) $\xi_N = \eta_N$ и $j < N$. Слой с индексом j=1 является первым слоем структуры, который находится в контакте с призмой (j=0), используемой для связи падающего света с эванесцентными модами. Расчет начинается с последнего N-го слоя, который является подложкой в нижней части структуры, и рекурсивно переходит к первому слою. η_j представляет собой эквивалент коэффициента отражения для одиночного слоя. В случае s-поляризованного света он определяется следующим образом:

$$\eta_j = \frac{k_{j-1,z} - k_{j,z}}{k_{j-1,z} + k_{j,z}}. \quad (3)$$

Для случая p-поляризованного света выражение становится немного сложнее:

$$\eta_j = \frac{k_{j-1,z}/\varepsilon_{j-1} - k_{j,z}/\varepsilon_j}{k_{j-1,z}/\varepsilon_{j-1} + k_{j,z}/\varepsilon_j}. \quad (4)$$

На рисунке 2 представлен спектр отражения от структуры вида Ge-Te-воздух. Расчет выполнен для длины волны 10,6 мкм. В отличие от мод структур вида диэлектрик-воздух-металл [11], для рассматриваемой нами структуры характерен набор горизонтальных линий. Это значит, что в нашем случае нет ограничений со стороны оптических свойств системы на угловой спектр световых пучков. Данную структуру можно использовать с пучками

относительно малого диаметра.

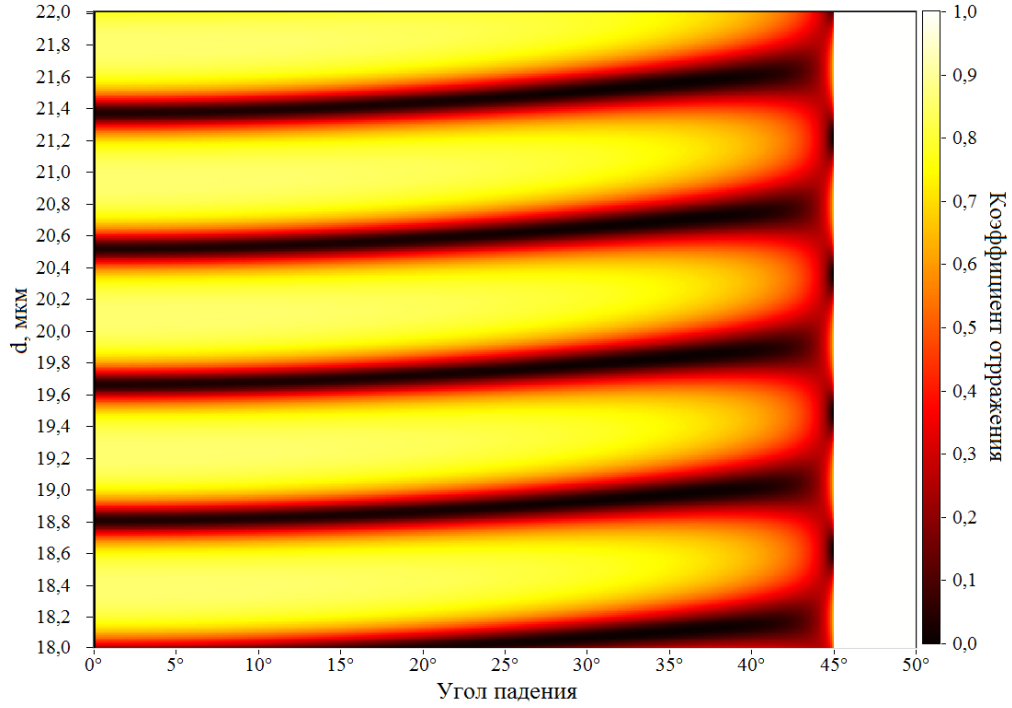


Рис. 2: Угловая характеристика структуры Ge-Te-воздух

С точки зрения акустических волн в работе предложено следующее. На поверхности теллура формируется периодическая решетка путем напыления металла. Объемная продольная акустическая волна из германия падает на слой теллура и в результате дифракции формируется волна Лява. Таким образом, отличие данной задачи заключается от рассмотренной в [11] заключается в том, что ультразвук модулирует не падающую объемную волну света, а волноводную моду в тонком слое.

2 Обсуждение

Ранее было установлено, что для структур диелектрик-воздух-металл акустическая модуляция диэлектрической проницаемости металла либо модуляция ширины воздушного зазора не эффективна. Это следует из анализа формул (1-3). Однако рассматриваемый в данной работе случай демонстрирует совсем иное. Как видно из рисунка 2, малые изменения толщины слоя теллура приводят к существенному изменению коэффициента отражения света. При этом толщина слоя d в выражении (2) – это длина оптического пути. Поэтому акустическая модуляция диэлектрической проницаемости теллура оказывается пропорциональна модуляции толщины d. В то же время акустическая модуляция диэлектрической проницаемости германия эквивалентна модуляции угла падения света на структуру. Благодаря тому, что акустическая энергия сосредоточена именно в слое теллура, в

рассматриваемой нами системе будет осуществляться эффективная модуляция коэффициента отражения света. Так как волна бежит вдоль поверхности, то распределение коэффициента отражения будет представлять собой пространственную решетку, на которой будет происходить дифракция. Анализ показывает что в такой структуре можно добиться около 10% на 1Вт акустической мощности на длине волны 10,6 мкм. Хотя при этом будет происходить дифракция на тонком акустическом пучке.

Заключение

В работе предложена и исследована принципиально иная конфигурация акустооптического устройства. Особенности акустооптического взаимодействия в данной системе могут существенно отличаться от дифракции на объемных акустических волнах. Тем не менее данная система имеет некоторые преимущества по сравнению с объемными акустооптическими устройствами. Основным достоинством такой системы является ее компактность. Однако она же имеет преимущества и перед структурами типа диэлектрик-воздух-металл. В первую очередь отсутствуют ограничения на угловую расходимость световых волн.

Список литературы

1. *Savage N.* Acousto-optic devices // Nature Photonics. 2010. **4**. P. 728–729.
2. *Tsai C.S.* Guided-Wave Acousto-Optics: Interactions, Devices, and Applications. Berlin: Springer-Verlag, 1990.
3. *Gupta N., Voloshinov V.B., Knyazev G.A., Kulakova L.A.* Optical transmission of single crystal tellurium for application in acousto-optic cells // J. Opt. 2011. **13**, № 5. P. 055702.
4. *Voloshinov V.B., Porokhovnichenko D.L., Dyakonov E.A.* Optimization of acoustooptic interaction geometry in KRS-5 crystal for far-infrared applications // Opt. Eng. 2017. **56**, №8. P. 087102.
5. *Zeng B., Huang Z., Singh A., Yu Yao, Azad A.K., Mohite A.D., Taylor A.J., Smith D.R., Hou-Tong Ch.* Hybrid graphene metasurfaces for high-speed mid-infrared light modulation and single-pixel imaging // Light: Science & Applications. 2018. **7**, №1. P. 51.
6. *Knyazev G.A., Kapralov P.O., Gusev N.A., Kalish A.N., Vetoshko P.M., Dagesyan S.A., Shaposhnikov A.N., Prokopov A.R., Berzhansky V.N., Zvezdin A.K., Belotelov V.I.* Magnetoplasmonic crystals for highly sensitive magnetometry // ACS Photonics. 2018. **5**, №12. P. 4951.
7. *Ignatyeva D.O., Sukhorukov A.P.* Femtosecond-pulse control in nonlinear plasmonic systems // Phys. Rev. A. 2014. 89. №1. P. 013850.
8. *Ignatyeva D.O., Sukhorukov A.P.* Plasmon beams interaction at interface between metal and

dielectric with saturable Kerr nonlinearity // Appl. Phys. A. 2012. **109**, №4. P. 813.

9. *Ignatyeva D.O., Davies C.S., Sylgacheva D.A., Tsukamoto A., Yoshikawa H., Kapralov P.O., Kirilyuk A., Belotelov V. I., Kimel A. V.* Plasmonic layer-selective all-optical switching of magnetization with nanometer resolution // Nature Communications. 2019. **10**, №1. P. 1.
10. *Kolomenskii A.A., Surovic E., Schuessler H.A.* Optical detection of acoustic waves with surface plasmons // Appl. Opt. 2018. **57**, №20. P. 5604.
11. *Sopko I.M., Knyazev G.A.* Plasmonic enhancement of mid- and far-infrared acousto-optic interaction // Appl. Opt. 2018. **57**, №10. P. C42.

УДК: 534.23 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39623

Визуализация неоднородностей в ультразвуковых излучателях акустооптических приборов

С.А. Титов[1,a], Е.А. Давыдова[1,b]

[1] *Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Россия. 117342 Москва, Бутлерова, 15.*

E-mail: [a]sergetitov@mail.ru, [b]zhedavydova@yandex.ru

Аннотация: Рассмотрен метод обнаружения и визуализации структурных неоднородностей в излучателях сдвиговых волн. Он основан на регистрации распространяющихся в иммерсионной среде продольных волн, генерируемых за счет искажения поля сдвиговых деформаций на структурных неоднородностях пьезоэлектрического излучателя. Экспериментальная апробация метода выполнена с помощью преобразователя из ниобата лития, присоединенного к звукопроводу из парателлурита. Экспериментально наблюдаемые особенности поведения принятых сигналов подтверждены путем математического моделирования.

Ключевые слова: акустооптическая ячейка, излучатель сдвиговых волн, трансформация мод, вытекающие поверхностные волны

Visualization of inhomogeneities in ultrasonic radiators of acousto-optic devices

S.A. Titov[1,a], E.A. Davydova[1,b]

[1] *Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of RAS, Russia, 117342 Moscow, Butlerova 15;*

E-mail: : [a]sergetitov@mail.ru, [b]zhedavydova@yandex.ru

Abstract: A method for detecting and visualizing structural inhomogeneities in shear wave radiators is considered. It is based on recording longitudinal waves propagating in an immersion medium, generated by distortion of the shear strain field by structural inhomogeneities in a piezoelectric radiator. Experimental validation of the method was performed using a lithium niobate transducer connected to a paratellurite acoustic wave guide. The experimentally observed behavioral features of the received signals were confirmed through mathematical modeling.

Keywords: acousto-optic cell, shear wave radiator, mode conversion, leaky surface waves

PACS: 43.35.Yb

Введение

Характеристики акустооптических приборов в значительной степени определяются свойствами ультразвуковых излучателей, создающими в кристалле динамическую дифракционную решетку. Наличие неоднородностей в структуре излучателей может приводить к существенным искажениям формируемого акустического поля. Обнаружение и характеризация дефектов в излучателях продольных волн может быть выполнена в соответчики с методиками, описанными в литературе [1-2]. Однако они не могут быть применены для излучателей сдвиговых волн, так как в них колебания направлены вдоль поверхности. Недавно было предложено [3] для обнаружения дефектов в излучателях сдвиговых волн использовать эффект трансформации сдвиговых колебаний на неоднородностях структуры в продольные волны, которые могут быть приняты в иммерсионной схеме. В данной работе приведены результаты экспериментальной апробации метода и численного моделирования генерации волн волновых мод неоднородностями в структуре излучателей сдвиговых волн.

1 Экспериментальное исследование

Экспериментальная апробация метода выполнена с помощью пьезопреобразователя 1 из ниобата лития, присоединенного к звукопроводу 2 из парателлурита (рис. 1). Возбуждение излучателя осуществлялось электрическими импульсами, что приводило к возникновению сдвиговых осцилляций вдоль оси *x*. Однородные, бездефектные участки пьезопластины не излучали в иммерсионную жидкость 6 продольную волну. Однако взаимодействие сдвиговых колебаний с неоднородностями (дефект 9) приводило к возникновению нормальной компоненты распределения поля, которое детектировалось фокусирующим приемным преобразователем 7. Частотный диапазон генерируемых и принимаемых находился в диапазоне приблизительно 60-100 МГц.

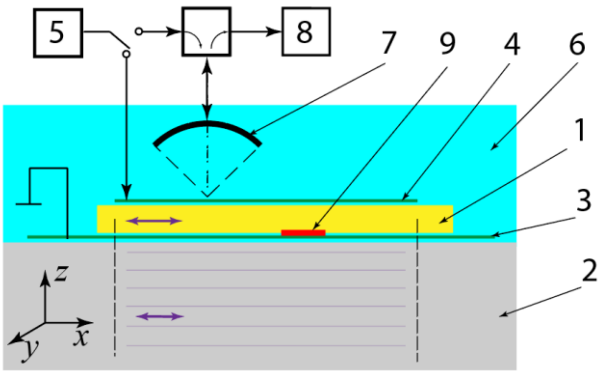


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 – пьезопластина; 2 – звукопровод; 3 – нижний электрод; 4 – верхний электрод; 5 – импульсный генератор; 6 – иммерсионная жидкость; 7 – приемный фокусирующий преобразователь; 8 – электронный блок; 9 – дефект.

Экспериментально было показано, что расслоения, имеющие размеры больше длины волны, излучают в иммерсионную жидкость отклики, амплитуда которых достаточна для регистрации на фоне шумов, причем сигналы от противоположных сторон расслоения, ориентированных перпендикулярно сдвиговым колебаниям, имеют противоположную фазу. Также обнаружено, что трещина, пересекающая пластину ниобата лития, является источником вытекающих поверхностных волн.

3 Математическое моделирование

Экспериментально наблюдаемые особенности поведения принятых сигналов были подтверждены путем математического моделирования. Расчет поля скорости ультразвуковых колебаний в области неоднородности в структуре излучателя сдвиговых волн проводился в среде Comsol Multiphysics. Показано, что края компактных неоднородностей в виде расслоения, параллельного границам пьезоэлектрического слоя, излучают в иммерсионную среду расходящиеся продольные волны, а поперечная трещина в слое возбуждает вытекающие поверхностные волны, распространяющие вдоль границы излучатель – иммерсионная жидкость в разные стороны с противоположными фазами.

Заключение

Предложен метод обнаружения и характеризации неоднородностей в пьезоэлектрических излучателях сдвиговых волн, основанный на регистрации продольных волн, излучаемых неоднородностями в иммерсионную жидкость при возбуждении сдвиговых колебаний. Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания FFNS-2025-0006. В исследованиях использовалось оборудование Центра коллективного пользования Научно-технологического центра уникального приборостроения РАН.

Список литературы

1. *Svilainis L., Kybartas D., Aleksandrovas A., Gomez Alvarez-Arenas T.* High frequency focused imaging for ultrasonic probe integrity inspection // NDT & E International. 2020. **116**. 102360.
2. *Eiras J.N., Gavérina L., Roch, J.-M.* Durability assessment of bonded piezoelectric wafer active sensors for aircraft health monitoring applications // Sensors. 2024. **24**(2), 450.
3. *Титов С.А., Давыдова Е.А.* Ультразвуковая визуализация неоднородностей в структуре излучателей сдвиговых волн // Письма в ЖТФ. 2025. **51**(20), 24–27.

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39624

Акустические и акустоптические свойства двуосных кристаллов на основе лития

Хоркин В.С.[1)], Мильков М.Г.[1)], Купрейчик М.И.[1)], Манцевич С.Н.[1)]

[1)]Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Ленинские горы 1, стр. 2, 119991.
Тел.: +7(495) 939-4697; Факс: +7(495) 932-8820; Email: vs_khorkin@mail.ru

В работе представлены результаты экспериментального исследования акустических и акустооптических свойств двуосных кристаллов на основе лития – тиоиндата лития ($LiInS_2$, LIS), селеноиндат лития ($LiInSe_2$, LISe), селеногаллат лития ($LiGaSe_2$, LGSe) и кристалла литий-натрий-молибдена ($LiNa_5Mo_9O_{30}$, LNM). Все перечисленные кристаллы относятся к орторомбической сингонии, класс симметрии *mm2*. В работе приводятся измеренные значения фазовых скоростей продольных и сдвиговых акустических волн, распространяющихся вдоль главных направлений в кристаллах. Кроме того, приводятся и анализируются определенные экспериментально коэффициенты акустооптического качества материалов при дифракции на продольных акустических волнах. В кристаллах $LiInS_2$ и LNM экспериментально получены геометрии изотропного АО взаимодействия, которые слабо чувствительны к поляризации падающего оптического излучения. Данная геометрия является перспективной для акустооптических модуляторов и дефлекторов неполяризованного излучения. Также проведено сравнение полученных результатов для рассматриваемых двуосных кристаллов, принадлежащих к одному классу симметрии, проанализирован вопрос о перспективах применения исследуемых двуосных кристаллов на основе лития.

Ключевые слова: двуосные кристаллы, акустооптическое качество, объемные акустические волны

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39625

Процессы в акустооптической системе с обратной связью, управляемой двухчастотным сигналом

Дьяконов Е.А.[1)], Манцевич С.Н.[1)]

[1)] Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва;

Тел.: +7(495) 939-44-04; E-mail: ead1989@gmail.com

В работе рассматривается акустооптическая система с обратной связью по оптическому каналу, где излучение, дифрагированное в акустооптической ячейке, вновь подается на вход этой ячейки. Поскольку акустооптическое взаимодействие сопровождается сдвигом частоты оптического излучения на величину, равную частоте управляющего ультразвукового сигнала, на выходе системы возникает набор равноотстоящих спектральных линий – оптическая частотная гребенка. В случае, если управляющий сигнал содержит две гармонических составляющих с близкими частотами, расщепление линий приобретает более сложный характер, а выходной сигнал имеет вид импульсов, частота следования которых соответствует разности частот между компонентами управляющего сигнала. Непосредственное нахождение спектра выходного сигнала методами Фурье-анализа затруднено в силу нелинейности акустооптического взаимодействия по акустическому сигналу. Поэтому для нахождения формы выходных импульсов был применен временной подход, основанный на методе медленно меняющихся амплитуд. В свою очередь, форма импульсов однозначно определяет искомый спектр выходного сигнала. Описанным методом были найдены типичные спектры выходного сигнала при различных соотношениях между амплитудами и частотами гармонических компонент управляющего сигнала, а также полосой брэгговского синхронизма акустооптической ячейки.

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В.Ломоносова

Ключевые слова: акустооптическое взаимодействие, акустооптическая система с обратной связью, оптическая частотная гребенка

Processes in an acousto-optic system with feedback driven by a dual-frequency signal

Dyakonov E.A.[1)], Mantsevich S.N.[1)]
[1)] Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation;
Tel.: +7(495) 939-44-04;
E-mail: ead1989@gmail.com

The paper examines an acousto-optic system with optical feedback, where radiation diffracted in an acousto-optic cell is fed back to the input of the cell. Since the acousto-optic interaction is accompanied by a frequency shift of the optical radiation equal to the frequency of the ultrasonic driving signal, a set of equally spaced spectral lines – an optical frequency comb – appears at the system's output. If the driving signal contains two harmonic components with close frequencies, the line splitting becomes more complex, and the output signal takes the form of pulses whose repetition frequency corresponds to the frequency difference between the driving signal components. Directly determining the output signal spectrum using Fourier analysis methods is difficult due to the fact that the acousto-optic interaction is non-linear relative to the acoustic signal. Therefore, a time-based approach based on the slowly varying amplitude approximation was used to determine the shape of the output pulses. The shape of the pulses, in turn, explicitly determines the desired spectrum of the output signal. Using the described method, typical output signal spectra were found for various ratios between the amplitudes and frequencies of the harmonic components of the driving signal, as well as the Bragg matching bandwidth of the acousto-optic cell.

This research has been conducted as part of a government-funded project by Lomonosov Moscow State University.

Keywords: acousto-optic interaction, acousto-optic system with feedback, optical frequency comb

УДК: 534.535 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39626

Акустооптическое пространственное управление квазибездифракционными кольцевыми пучками

В.И. Казаков[1,a], А.Г. Антонян[1], А.А. Маликов[1], О.В. Шакин[1,2], Г.В. Кулак[3]

[1] *Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия.*

[2] *Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия*

[3] *Мозырский государственный педагогический университет им. И.П. Шамякина, г. Мозырь, Беларусь.*

E-mail: [a] kvi@guap.ru

Аннотация: В данной работе представлены результаты экспериментального исследования процесса формирования и оценки эффективности акустооптического пространственного сканирования квазибездифракционных кольцевых пучков в кристалле парателлурита. Кольцевой пучок формировался от излучения лазера с длиной волны 628 нм с помощью расширителя пучка и тандема аксиконов. Пространственное сканирование осуществлялось экспериментальным образцом акустооптического дефлектора на основе кристалла парателлурита при перестройке частоты управляющего сигнала в диапазоне 65–95 МГц. В ходе эксперимента регистрировались интенсивность и профили падающих и дифрагированных пучков на различном расстоянии. Экспериментально показана возможность пространственного сканирования пучка с высокой эффективностью в широком диапазоне управляющих частот. Исследованы оптические схемы формирования и эволюция пространственного распределения кольцевого пучка в процессе распространения на расстояниях 1…100 м. Показан энергетический выигрыш использования кольцевых пучков (в части увеличения плотности энергии) по сравнению с гауссовыми пучками при распространении на большие расстояния.

Ключевые слова: бесселев пучок, акустооптика, дифракция, пространственное сканирование, оптическая связь.

Acousto-optic spatial control of quasi-diffraction-free annular beams

V.I. Kazakov[1,a], A.G. Antonyan[1], A.A. Malikov[1], O.V. Shakin[1,2], G.V. Kulak[3]

[1]*Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia.*

[2] *A. F. Ioffe Physical-Technical Institute, Saint Petersburg, Russia*

[3] *I. P. Shamyakin Mozyr State Pedagogical University,*

Mozyr, Belarus.

E-mail: [a] *kvi@guap.ru*

Abstract: This paper presents the results of an experimental study of the formation and efficiency evaluation of acousto-optic spatial scanning of quasi-diffraction-free annular beams in a paratellurite crystal. The annular beam was generated from a 628-nm laser using a beam expander and a tandem axicon. Spatial scanning was achieved using an experimental acousto-optic deflector based on a paratellurite crystal while tuning the control signal frequency in the 65–95 MHz range. During the experiment, the intensities and profiles of the incident and diffracted beams were recorded at various distances. The feasibility of highly efficient spatial beam scanning over a wide range of control frequencies was demonstrated. Optical schemes for the formation and evolution of the spatial distribution of an annular beam during propagation at distances of 1...100 m were investigated. The energy gain of using annular beams (in terms of increasing the energy density) compared to Gaussian beams during propagation over long distances was demonstrated.

Keywords: Bessel beam, acousto-optics, diffraction, spatial scanning, optical communications

PACS: 42.79.Jq, 78.20.Hp

Введение

Квазибездифракционные световые пучки, в частности бесселевы пучки нулевого порядка, в последние десятилетия привлекают устойчивое внимание исследователей благодаря своим уникальным свойствам: способности сохранять поперечную структуру при распространении в свободном пространстве на расстояния, значительно превышающие дифракционную длину гауссова пучка, а также свойству самореконструкции волнового фронта после прохождения препятствий [1–3]. Указанные особенности открывают широкие перспективы для применения бесселевых пучков в лазерной обработке материалов, оптических манипуляторах, нелинейной оптике и системах передачи данных [4].

Однако для практического внедрения таких пучков необходимы эффективные методы управления их пространственным положением, интенсивностью и направлением распространения. Одним из наиболее перспективных подходов является использование акустооптических устройств, которые обеспечивают высокое быстродействие, инерционность

на микросекундном уровне и возможность управления без механического перемещения элементов. В то же время дифракция и управление гауссовыми пучками в кристаллах изучены достаточно подробно [5], тогда как вопросы акустооптического взаимодействия для бесселевых и кольцевых пучков остаются малоисследованными [6–8].

В настоящей работе решается задача экспериментального исследования формирования кольцевых квазибездифракционных пучков с помощью двух аксиконов и последующего акустооптического сканирования этих пучков с использованием дефлектора на кристалле парателлурита. Проводится сравнение эффективности дифракции и углового сканирования с традиционным гауссовым пучком.

Оптическая схема формирования пучка и акустооптического пространственного сканирования

Для получения квазибездифракционного пучка, пригодного для последующего акустооптического управления, использовалась оптическая схема, представленная на рис. 1.

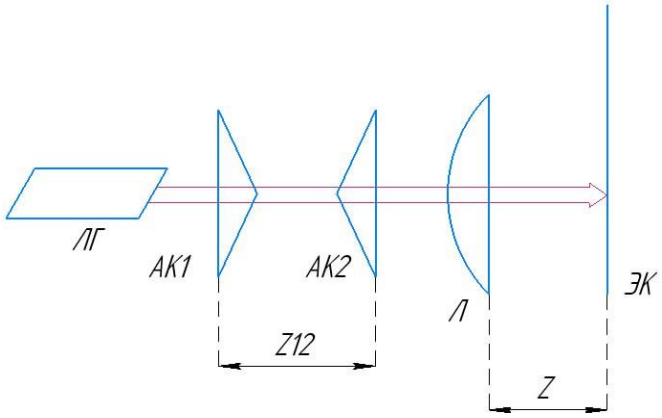


Рис. 1. Схема формирования кольцевого квазибездифракционного пучка с помощью двух аксиконов и линзы

Источником излучения служил гелий-неоновый лазер ЛГН-214 с длиной волны 628 нм, формирующий гауссов пучок. Пучок направлялся на первый аксикон (АК1) с углом при вершине 5° (угол конусности γ), который преобразовывал гауссов пучок в квазибездифракционный бесселев пучок. Далее излучение проходило через второй аксикон (АК2) с идентичным углом, установленный соосно на расстоянии Z12 = 50 мм. Тандем аксиконов формировал узкое кольцевое поле. За аксиконами располагалась фокусирующая линза с фокусным расстоянием f = 115 мм, которая формировала квазибездифракционный пучок, преобразующийся в дальней зоне в пучок с интенсивным центральным максимумов и малым числом боковых колец.

Экспериментальная установка (рис. 2) включала: лазер (1), расширитель пучка (2), тандем аксиконов (3, 4) с углами 10°, фокусирующую линзу (5), акустооптический дефлектор на кристалле парателлурита (6), генератор-синтезатор частот с усилителем (7), ПЗС-камеры для регистрации профиля пучка (8) и персональный компьютер (9).

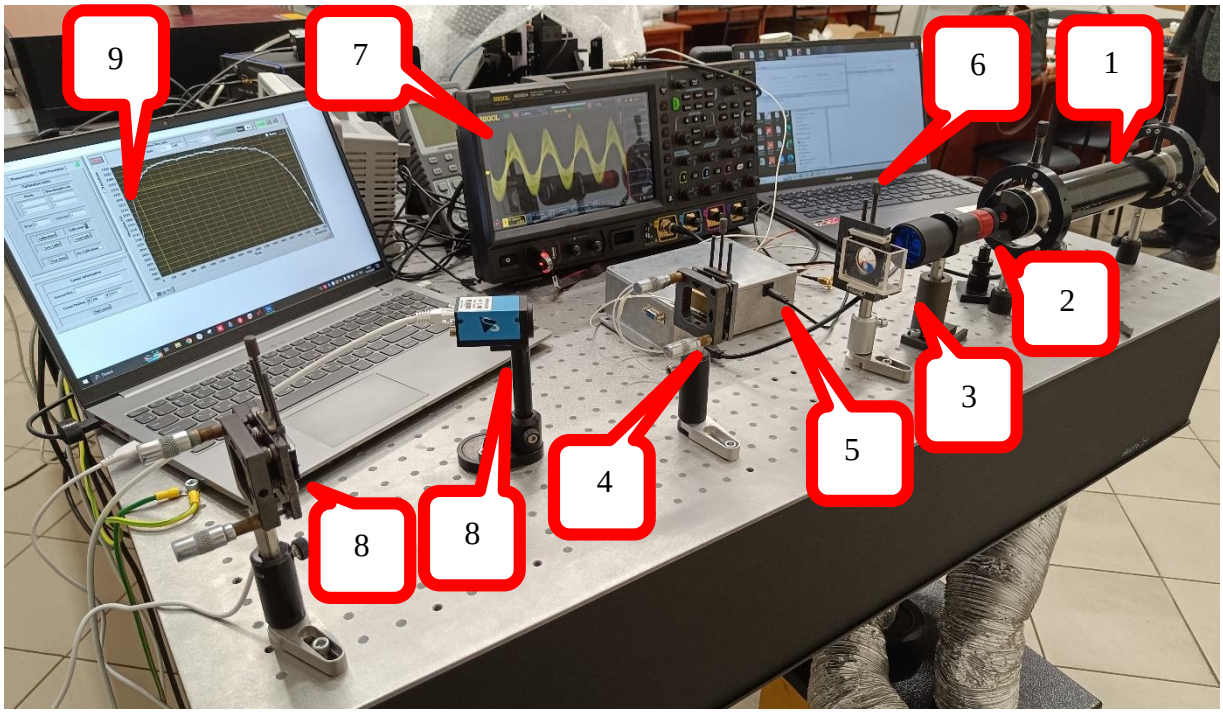


Рис. 2. Экспериментальная установка для исследования акустооптического управления квазибездифракционными пучками

Акустооптический дефлектор работал в режиме брэгговской дифракции. Управляющий сигнал перестраивался в диапазоне частот 65–95 МГц при мощности 2 Вт. Регистрация дифрагированного излучения проводилась на расстояниях от 1 до 100 м с помощью ПЗС-линейки.

На рис. 3 представлены измеренные зависимости эффективности дифракции (отношение интенсивности дифрагированного пучка к интенсивности падающего) от частоты управляющего сигнала на расстоянии 50 м.

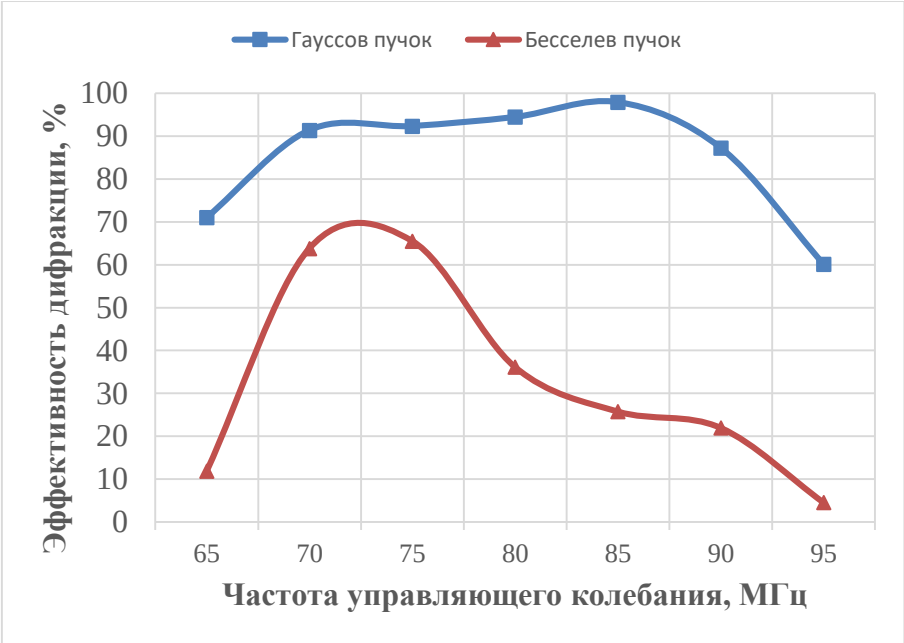


Рис. 3. Зависимость эффективности дифракции от частоты управляющего сигнала для гауссова (кривая 1) и бесселева (кривая 2) пучков

Заключение

Для гауссова пучка эффективная дифракция (более 80%) наблюдается во всем диапазоне частот 65–95 МГц, а максимальная эффективность достигает 95%. Для бесселева пучка диапазон высокоэффективной дифракции сужается до 10 МГц (70–80 МГц), а максимальная эффективность составляет около 70%. Данное снижение связано с тем, что после аксикона пучок имеет коническую сходимость, что ухудшает пространственное согласование с акустическим полем в кристалле.

Благодарность: Работа выполнена при финансовой поддержке Санкт-Петербургского научного фонда, проект №25-РБ-09-14.

Список литературы

1. *Durnin J.* Exact solutions for nondiffracting beams // J. Opt. Soc. Am. 1987. Vol. 4. № 4. P. 651–654.
2. *Herman R. M., Wiggins T. A.* Production and uses of diffractionless beams // J. Opt. Soc. Am. 1991. Vol. 8. № 6. P. 932–942.
3. *Bandres M. A., Gutierrez-Vega J. C.* Airy-Gauss beams and their transformation by paraxial optical systems // Optics Express. 2007. Vol. 15. № 25. P. 16727–16736.
4. *Белый В. Н., Казак Н. С., Хило Н. А.* Преобразование частоты бесселевых световых пучков нелинейными кристаллами // Квантовая электроника. 2000. Т. 30. № 9. С. 753–766.
5. *Балакший В. Н., Парыгин В. Н., Чирков Л. Е.* Физические основы акустооптики. М.: Радио и связь, 1985. 280 с.
6. *Kulak G. V., Shakin O. V., Kazakov V. I., et al*. Diffraction of annular light beams by ultrasound in paratellurite crystals // WECONF: Wave electronics and its application in information and telecommunication systems. 2024. P. 10564674.
7. *Кулак Г. В., Шакин О. В., Казаков В. И. и др.* Дифракция кольцевых световых пучков на ультразвуке в кристаллах парателлурита // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы: XXVII Междунар. науч. конф. (СПб., 3–7 июня 2024 г.): сб. ст. Ч. 3. СПб.: ГУАП, 2024. С. 85–89.
8. *Белый В. Н., Кулак Г. В., Тозик Л. А., Шакин О. В.* Дифракция двухпараметрических кольцевых световых пучков на ультразвуке в кристаллах парателлурита // Проблемы физики, математики и техники. 2024. № 2 (14). С. 11–15.

УДК: 681.785 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39627

Квазираспределенная оптоволоконная микрофонная система на основе фазочувствительного рефлектометра

Гаврилин П.Г. [1,a], Почтарев И.С. [1,2], Харасов Д.Р.[1,b], Бенгальский Д.М.[1], Трещиков В.Н.[1]

[1] *Группа компаний Т8, Москва, Краснобогатырская ул., 44, стр. 1, 107076, Россия*
[2] *Институт Лазерных и Плазменных технологий, НИЯУ МИФИ, Москва, Каширское шоссе, 31, 115409, Россия*
E-mail: [a]gavrilin@t8.ru, [b]kharasov@t8.ru

Аннотация: Продемонстрирована квазираспределенная (многоканальная) микрофонная система на базе фазочувствительного рефлектометра (Ф-OTDR) Т8 «Дунай». В качестве чувствительного элемента (микрофонов) используется цилиндрическое основание с намотанным на него стандартным одномодовым волокном. Микрофоны соединяются последовательно с помощью отрезков волоконно-оптического кабеля. В отличие от классических решений, где каждый чувствительный элемент представляет собой дискретный интерферометр с зеркалами или разветвителями, в системе основанной на Ф-OTDR само волокно представляет собой распределённый интерферометр. Демультиплексирование сигналов от отдельных микрофонов осуществляется по времени задержки обратно рассеянного света. Это позволяет значительно снизить оптические потери на каждом датчике (которые определяются в основном потерями на сварках с кабелем) и сделать создание многоканальных систем технически простым. За счёт низких потерь в волокне микрофоны могут быть удалены от блока опроса (рефлектометра) на более 100 км без использования промежуточных оптических усилителей.

Ключевые слова: фазочувствительный рефлектометр, распределённый акустический датчик, волоконно-оптический микрофон

Quasi-distributed fiber-optic microphone system based on phase-sensitive optical time-domain reflectometry

Gavrilin P.G. [1,a], Kharasov D.R.[1,b], Bengalsky D.M.[1], Pochtarev I.S.[1,2], Treshchikov V.N.[1]

[1] *T8, Moscow 107076, Russia.*
[2] *Institute for laser and plasma technologies, Moscow Engineering Physics Institute (MEPhI), Moscow 115409, Russia.*
E-mail: [a]gavrilin@t8.ru, [b]kharasov@t8.ru

Abstract: A quasi-distributed (multichannel) microphone system based on the T8 "Dunai" phase-sensitive time domain reflectometer (Ф-OTDR) is demonstrated. A cylindrical base with standard single-mode fiber wound around it serves as the sensing element (microphones). Microphone array

are connected in series using fiber-optic cable segments. Unlike traditional solutions, where each sensing element is a discrete interferometer with mirrors or splitters, in a system based on Ф - OTDR, the fiber itself is a distributed interferometer. Signals from individual microphones are demultiplexed using the backscattered light delay time. This significantly reduces optical losses at each sensor (which are primarily determined by splice losses with the cable) and simplifies the creation of multichannel systems. Due to the low fiber losses, microphones can be located over 100 km from the interrogation unit (reflectometer) without the use of intermediate optical amplifiers.

Keywords: phase-sensitive optical time-domain reflectometer, distributed acoustic sensor, fiber-optic microphone

PACS: 42.81.Pa: 43.38.Kb

Введение

Распределённые акустические системы (Distributed Acoustic Sensing, DAS) [1] на основе фазочувствительного рефлектометра во временной области (Ф-OTDR) широко используются в качестве распределённых акустических, вибрационных и температурных датчиков для мониторинга и защиты протяжённых объектов, таких как трубопроводы, автомобильные и железные дороги [2]. Ведутся исследования по применению Ф-OTDR для акустического мониторинга [3].

В Ф-OTDR в качестве чувствительного элемента используется одномодовое оптическое волокно, что позволяет детектировать акустическое воздействие в любой точке линии длиной до десятков километров. Принцип работы рефлектометра основан на зондировании волокна когерентными оптическими импульсами и регистрации интерференционной картины рэлеевского обратного рассеяния. Внешняя акустическая волна деформирует участок волокна, изменяя его длину и показатель преломления, что вызывает модуляцию фазы рассеянного сигнала. Измеряя временную задержку и фазовый сдвиг, система обеспечивает высокую чувствительность к деформациям (до единиц пикострейн/√Гц) и пространственное разрешение порядка метров, выступая в роли распределённого волоконно-оптического микрофона [4]. Главным преимуществом использования оптического волокна в качестве распределённого акустического датчика является его пассивность и устойчивость к внешним воздействиям. Волокно не требует электропитания вдоль всей трассы, невосприимчиво к электромагнитным помехам и коррозии, а также сохраняет работоспособность в условиях агрессивных сред, тумана, осадков и значительных перепадов температур. По сравнению с традиционными видео- или радиолокационными системами, волоконно-оптические решения обладают существенно меньшей стоимостью на километр мониторинга и позволяют организовать непрерывное наблюдение за протяжёнными объектами. Кроме того,

использование стандартных телекоммуникационных волокон даёт возможность интегрировать DAS в уже существующие оптические сети без прокладки дополнительных кабелей [1].

Однако применение стандартных DAS-систем для регистрации акустических сигналов в средах с низким акустическим импедансом (таких как воздух или вода) сталкивается с фундаментальным ограничением: характерные длины акустических волн в таких средах зачастую существенно меньше типичной базы измерения Ф-OTDR и это приводит к выраженному эффекту пространственного усреднения акустического воздействия на волокно, что резко снижает чувствительность системы и изменяет ее амплитудно-частотную характеристику, затрудняя детектирование и анализ сигналов в широком частотном диапазоне (100 Гц – 20 кГц). Для преодоления этого ограничения были предложены конструкции волоконно-оптических микрофонов (ВОМ) на основе чувствительных элементов (чаще всего цилиндрических мандрелей), на которые наматывается оптическое волокно [5]. Также применяется технология создания искусственных отражателей (ИО) за счет локальных модификаций показателя преломления с повышенным коэффициентом отражения в волокне (рис. 1). ИО с коэффициентом отражения -40 дБ позволяют избавиться от случайных флуктуаций фазы сигнала, отраженного назад за счет Рэлеевского рассеяния, увеличить динамический диапазон датчика и сделать базу измерения меньше длительности импульса [6]. В данной работе исследуется параметры ВОМ опрашиваемых Ф-OTDR Т8 «Дунай».



Рисунок 1. Волоконно-оптический микрофон с искусственными отражателями.

1 Эксперимент

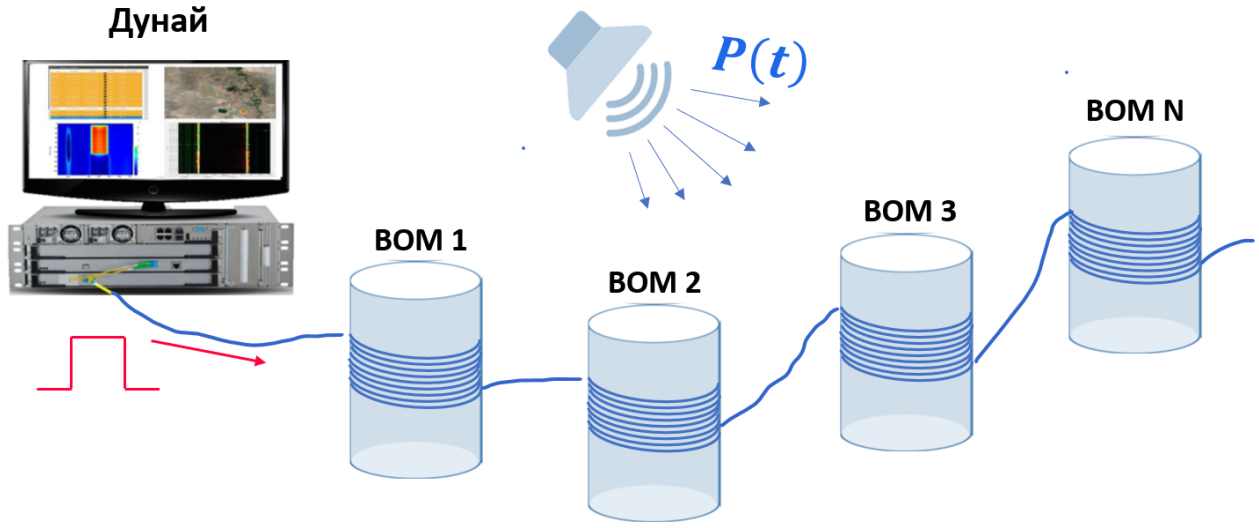


Рисунок 2. Схема эксперимента («Дунай» - распределенный акустический датчик компании Т8 (интеррогатор), ВОМ – волоконно-оптический микрофон, P(t) – акустическое давление).

Экспериментальная установка показана на рис. 2. В линию длиной ~20 км включен массив ВОД в форме полого цилиндра с намотанным волокном, который опрашивается с помощью Ф-OTDR Т8 «Дунай» с частотой повторения 4-5 кГц. В качестве акустического воздействия подавалась серия синусоидальных сигналов с линейно нарастающей амплитудой на разных несущих в диапазоне от 500 до 1500 Гц с шагом 100 Гц. Шумомер измерял акустическое давление p, приходящее на ВОД, а «Дунай» извлекал фазу φ. Из их отношения была рассчитана чувствительность микрофона $S = \varphi/p$ в дБ относительно 1 рад/мкПа для каждой частоты. АЧХ чувствительности представлена на рис. 3.

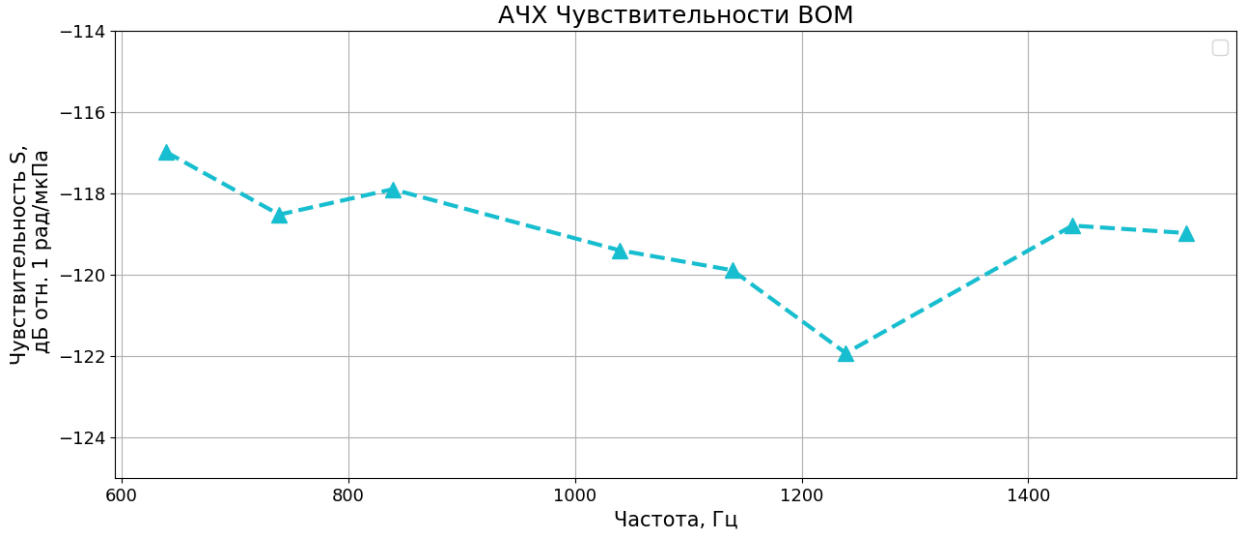


Рисунок 3. Амплитудно-частотная характеристика волоконно-оптического микрофона.

Также был измерен уровень собственного шума микрофона в отсутствии сигнала. Для фазы это значение составило 34.6 мрад. При помощи чувствительности S рассчитан уровень

эквивалентного звукового давления, обусловленного внешними помехами или собственным шумом для разных частот (рис. 4).

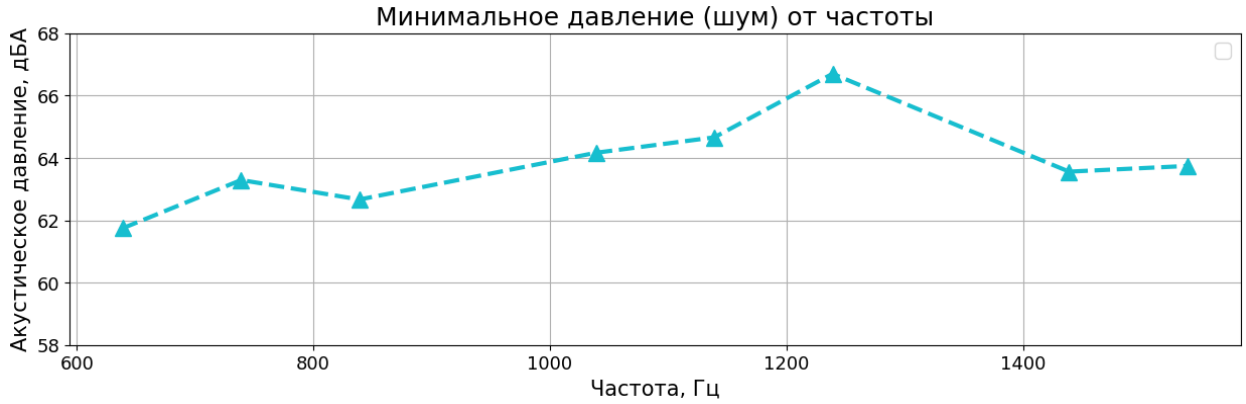


Рисунок 4. Зависимость минимального детектируемого давления от частоты.

Заключение

Показана принципиальная возможность создания квазираспределённой оптоволоконной микрофонной системы на основе фазочувствительного рефлектометра. Описаны ее преимущества над электронными аналогами. Измерены амплитудно-частотные характеристики параметров волоконно-оптического микрофона: чувствительности (от -122 до -117 дБ относительно 1 рад/мкПа) и минимальное детектируемое давление в полосе 2 кГц (от 62 до 66 дБА).

Список литературы

1. *Hartog A. H.* An Introduction to Distributed Optical Fibre Sensors. Boca Raton: CRC press, 2017. 427 p.
2. *Попов А. Н., Галинуров Р. З.* Волоконно-оптические технологии в системах управления движением поездов и контроля состояния объектов инфраструктуры // Транспорт Урала. 2018. 58, № 3. С. 48–54.
3. *Franciscangelis C. et al.* Real-time distributed fiber microphone based on phase-OTDR //Optics express. – 2016. – Т. 24. – №. 26. – С. 29597-29602.
4. *Наний О. Е., Никитин С. П., Трещиков В. Н.* Влияние фазовых шумов лазера на работу когерентного рефлектометра при использовании волокон с массивами искусственных отражателей //Автометрия. – 2023. – Т. 59. – №. 1. – С. 87.
5. *Каменев О. Т., Ромашко Р. В., Кульчин Ю. Н.* Волоконно-оптические гидрофоны //Москва: ТЕХНОСФЕРА. – 2022.
6. *Bengalskii D. et al.* ϕ-OTDR accuracy enhancement using arrayed artificial reflectors //Optical Fiber Technology. – 2026. – Т. 99. – С. 104622.

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39628

Коллинеарное акустооптическое взаимодействие в системе с оптоэлектронной обратной связью

Балакший В.И.[1)], Манцевич С.Н. [1)], Купрейчик М.И. [1)]

[1)]Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва.

Тел.: +7(906)075-0295; E-mail: balakshy@phys.msu.ru; balakshy@gmail.com

В докладе представлены новые результаты исследования эффекта коллинеарного акустооптического взаимодействия в системе с положительной обратной связью, осуществляемой путем подачи выходного сигнала фотоприемника на пьезопреобразователь акустооптической ячейки, изготовленной из кристалла молибдата кальция ($CaMoO_4$). Рассмотрены различные режимы работы такой системы в зависимости от величины обратной связи, мощности акустического и оптического сигналов, акустооптической фазовой расстройки и других параметров системы. Определены условия, при которых система переходит в режим генерации собственных колебаний, как гармонических, определяемых параметрами акустооптической ячейки, так и импульсных оптических и акустических колебаний с частотой следования, задаваемой длиной акустооптической ячейки, и длительностью, зависящей от коэффициента обратной связи. Эксперимент выполнен с акустооптической ячейкой с параметрами: длина ячейки в направлении распространения света и ультразвука – 4 см, частота ультразвука – 46 МГц, длина волны оптического излучения – 633 нм, постоянная времени ячейки – 13,7 мкс. Рассмотрены возможности применения исследованной системы в задачах оптической обработки информации.

Ключевые слова: акустооптическое взаимодействие; коллинеарная дифракция света; оптоэлектронный генератор; гибридная обратная связь; фазовый синхронизм

УДК: 535.41+639.3 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39629

Цитологическое исследование крови рыб методом цифровой голографической микроскопии с акустооптической перестройкой

О.В. Польщикова[1,a], А.С. Мачихин[1,b], Н.Н. Романова[2,c]

[1] *Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук. 117342, Москва, ул. Бутлерова, д. 15.*

[2] *Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, Филиал по пресноводному рыбному хозяйству ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО» («ВНИИПРХ»). 141821, Московская область, Дмитровский городской округ, поселок Рыбное, дом 40А.*

E-mail: [a]polschikova@ntcup.ru, [b]machikhin@ntcup.ru, [c]lab.ihtiopat@mail.ru

Аннотация: Исследование морфологии и количественных параметров элементов крови рыб представляет научный и практический интерес для решения задач оценки здоровья рыб в аквакультуре, экологического мониторинга водоемов, изучения влияния изменения климата, диагностики воздействия фармацевтических препаратов, кормовых добавок и др. Стандартным методом исследования морфологического состава крови рыб является световая микроскопия окрашенных мазков. Кроме того, применяются и новые методы исследования, дополняющие традиционный подход: количественная фазовая микроскопия, фотооптический и апертурно-импедансный методы, цифровая голография, ИИ-классификация, визуализация кровотока с помощью лазерной допплеровской голографии. Мультиспектральная цифровая голографическая микроскопия может дать новую информацию о спектральных свойствах клеток крови и повысить точность восстановления данных. В работе представлены результаты исследования мазков крови рыб радужной форели (*Parasalmo mykiss*, Walbaum, 1792) с помощью мультиспектральной цифровой голографической микроскопии на основе акустооптической фильтрации излучения.

Ключевые слова: мультиспектральная цифровая голографическая микроскопия, акустооптический перестраиваемый фильтр, цитология крови, гематология рыб

Cytological examination of fish blood by digital holographic microscopy with acousto-optic tuning

O.V. Polschikova[1,a], A.S. Machikhin[1,b], N.N. Romanova[2,c]

[1] *Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences. Moscow 117342, Russia.*

[2] *Freshwater Fisheries Branch of the Scientific Research Center of the Russian Federation VNIRO Federal State Budgetary Institution («VNIIPRH»). Rybnoye 141821, Russia.*

E-mail: [a]polschikova@ntcup.ru, [b]machikhin@ntcup.ru, [c]lab.ihtiopat@mail.ru

Abstract: The study of morphology and quantitative parameters of fish blood elements is of scientific and practical interest for solving the problems of assessing fish health in aquaculture, environmental monitoring of reservoirs, studying the effects of climate change, diagnosing the effects of pharmaceuticals, feed additives, etc. The standard method for studying the morphological composition of fish blood is light microscopy of stained smears. In addition, new research methods are used that complement the traditional approach: quantitative phase microscopy, photo-optical and aperture-impedance methods, digital holography, AI classification, visualization of blood flow using laser Doppler holography. Multispectral digital holographic microscopy can provide new information about the spectral properties of blood cells and improve the accuracy of data recovery. The paper presents the results of a study of blood smears of rainbow trout fish (*Parasalmo mykiss*, Walbaum, 1792) using multispectral digital holographic microscopy based on acousto-optic filtration of light.

Keywords: multispectral digital holographic microscopy, acousto-optic tunable filter, blood cytology, fish hematology

PACS: 42.40.Kw, 43.35.Sx, 87.64.−t

Введение

Гематологический статус является важным маркером физиологического состояния рыб, условий среды их обитания и питания [1]. При этом автоматизированный анализ крови рыб до сих пор остается малодоступным методом исследования, поскольку большинство ветеринарных гематологических анализаторов некорректно работают с цельной кровью рыб [2, 3]. Это связано со спецификой клеток, например наличием ядра у эритроцитов рыб (по сравнению с млекопитающими, в том числе человеком, у которых эритроциты безъядерные), особенностями морфологии клеток у разных видов рыб, а также условиями содержания и кормления в аквакультуре, что может влиять на размеры и морфологию. В результате подсчет клеток крови и идентификация морфологических форм лейкоцитов и эритроцитов

осуществляется вручную по фиксированным мазкам крови [4], что является трудоемким и субъективным процессом, занимающим много времени и зависящим от квалификации специалиста. Таким образом, существует необходимость в оснащении ихтиопатологических лабораторий автоматизированными системами анализа крови и разработке соответствующих методов количественной оценки. Предлагаемые тезисы демонстрируют первые результаты применения мультиспектральной цифровой голографической микроскопии (ЦГМ) с акустооптической перестройкой по спектру для оценки морфологии клеток крови рыб по мазкам.

1 Экспериментальная установка

В качестве широкополосного источника излучения в экспериментальной установке мультиспектральной ЦГМ используется генератор суперконтинуума. Перестраиваемый акустооптический фильтр выделяет из его спектра узкие спектральные интервалы в видимом диапазоне излучения. Далее свет поступает в интерферометр Маха-Цендера, ветви которого содержат идентичные микрообъективы и тубусные линзы. В одной из ветвей интерферометра устанавливается предметное стекло с мазком крови. Интерферометр настраивается на нулевую разность хода по внеосевой схеме интерференции. После интерферометра система из двух линз обеспечивает итоговое оптическое увеличение ~120× для регистрации цифровых голограмм клеток крови с помощью видеокамеры.

Фазовая задержка $\Delta\varphi$, внесенная в световую волну клетками крови, прямо пропорциональна их толщине h, показателю преломления вещества крови n_s и окружающей среды n_e (в данном случае воздуха) и рассчитывается по формуле:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}(n_s - n_e)h,$$

где λ – длина волны излучения. Таким образом, по фазовой карте можно судить о толщине объекта, распределении и концентрации веществ в нем.

2 Результаты и обсуждение

На рис. 1, *а–г* представлены фазовые карты мазка крови радужной форели (*Parasalmo mykiss*, Walbaum, 1792) на длинах волн 538, 584, 641 и 711 нм, полученные с помощью описанной экспериментальной установки. На исследуемом участке содержатся эритроциты, тромбоцит и тень поврежденной клетки. В данном случае интерес представляет анализ фазового набега, внесенного цитоплазмой и ядрами эритроцитов в мультиспектральном режиме.

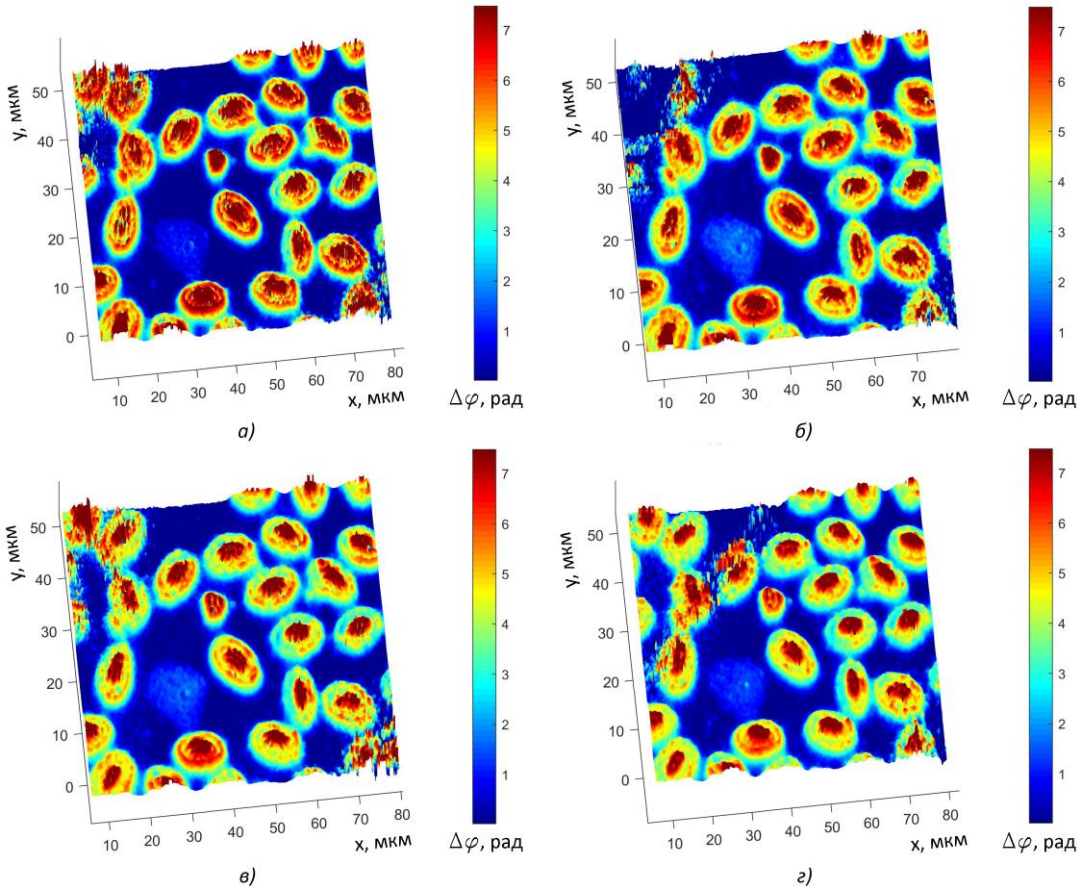


Рис. 1. Фазовые карты мазка крови радужной форели на длинах волн 538 (*а*), 584 (*б*), 641 (*в*), 711 (*г*) нм.

Из рисунка видно, что хроматин ядра демонстрирует более высокий показатель преломления по сравнению с гемоглобином цитоплазмы. Это различие обусловлено структурно-химическими особенностями данных компонентов: плотная упаковка ДНК в комплексе с гистоновыми белками в составе хроматина формирует среду с повышенной оптической плотностью, тогда как растворённый в цитоплазме гемоглобин характеризуется меньшей плотностью молекулярной упаковки. Такое различие позволяет эффективно дифференцировать ядро и цитоплазму клеток без использования окрашивания при восстановлении фазовых изображений в ЦГМ.

Кроме того, по величине фазового сдвига на разных длинах волн можно сделать вывод о том, что хроматин демонстрирует более слабую зависимость показателя преломления от длины волны в видимом спектре, чем гемоглобин, который проявляет выраженную дисперсию.

Указанные оптические свойства открывают возможности для мультиспектральной ЦГМ, позволяющей не только визуализировать морфологию клеток крови рыб, но и количественно оценивать распределение хроматина и концентрацию гемоглобина на основе фазовых карт. Следует отметить, что к настоящему моменту подобные исследования в мультиспектральной ЦГМ проводились в основном только с кровью человека [5].

Заключение

В работе предложено использовать метод мультиспектральной цифровой голографической микроскопии на основе акустооптической фильтрации излучения для оценки морфологии клеток крови рыб. В отличие от классической микроскопии мазков с помощью данного метода получают значение фазовой задержки, зависящей от толщины и показателя преломления вещества крови в каждой изображаемой точке, что, во-первых, позволяет получить количественную информацию о структуре цитоплазмы и ядра клеток для определения состояния системы кроветворения и всего организма в целом, а во-вторых, расширяет возможности для автоматизированной дифференциации и подсчета клеток.

Финансирование работы. Исследование выполнено в рамках Государственных заданий Филиала по пресноводному рыбному хозяйству ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО» («ВНИИПРХ») № 076-00005-25-00 «Проведение прикладных научных исследований» (подготовка и гематологический анализ образцов) и НТЦ УП РАН № FFNS-2025-0008 (анализ образцов методом мультиспектральной цифровой голографической микроскопии).

Благодарности. Результаты работы получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования НТЦ УП РАН [http://ckp.ntcup.ru].

Список литературы

1. *Романова Н.Н., Головина Н.А., Головин П.П., Ефремова Е.В., Вараксина В.В.* Гематологические показатели муксуна (*Coregonus muksun salmonidae*) при формировании ремонтно-маточного стада в условиях рыбоводного завода. // Вопросы рыболовства. 2020. **21**, № 3. С. 331.
2. *Mesalles M., Uroz M., Brandts I., Serrano E., Cuenca R., Pastor J., Teles M.* Preliminary evaluation of an automated blood cell analyzer for its use with blood samples from rainbow trout *Oncorhynchus mykiss*. // Animals. 2025. **15**. P. 1265.
3. *Pardede M.A., Aziz M.A., Apriliani D.P., Kumalaningrum D.R., Ambarwati D., Mauludia F., Asyabil A., Maulana M.H.* Analysis of hematological profile of catfish (*Clarias* sp.) as a health indicator use of hemolyzer for aquatic animals. // Juvenil. 2025. **6**, N 4. P. 355.
4. Методические указания по проведению гематологического обследования рыб. Разр. ТИНРО-центр и КаспНИРХ; утв. Минсельхозпродом РФ 02.02.1999. М., 1999.
5. *Turko N.A., Shaked N.T.* Erythrocyte volumetric measurements in imaging flow cytometry using simultaneous three-wavelength digital holographic microscopy. // Biomed. Opt. Express. 2020. **11**, N 11. P. 6649.

УДК: 534.2, 535.5 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39630

Вариант акустооптической модуляции произвольно поляризованного излучения на основе аксиальной геометрии в парателлурите

В.А. Подольский[1], Ю.Г. Резвов[2], О.Д. Сивкова[1]

[1] *Новомосковский институт Российского химико-технологического университета им. Д.И. Менделеева. 301665, Тульская обл., Новомосковск, ул.Дружбы, 8*

[2] *Фонд Мельниченко, Центр талантов "Новомосковск". 301650, Тульская область, г. Новомосковск, ул.Куйбышева д.15Г*

E-mail: rezvovyug@mail.ru

Аннотация: Для акустооптической поляризационно-независимой модуляции излучения предложено использовать аксиальную геометрию в парателлурите. При этом взаимодействующие световые волны распространяются симметрично вблизи оптической оси, ультразвук распространяется без сноса вдоль оси [110], что существенно при создании компактных устройств. Принципиальной особенностью выбранной геометрии является неустранимая расстройка синхронизма, что ограничивает максимальную длину взаимодействия (длину преобразователя). Показано, что использование режима перемодуляции смягчает ограничение, позволяя увеличить длину преобразователя примерно в 3 раза.

Ключевые слова: анизотропная акустооптическая дифракция, акустооптический модулятор, поляризация света, парателлурит, аксиальная геометрия, режим перемодуляции

Acousto-optical modulation of arbitrarily polarized radiation based on axial geometry in paratellurite

V.A. Podolsky[1], Yu.G. Rezvov[2], and O.D. Sivkova[1]

[1] *Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Novomoskovsk Branch. Novomoskovsk 301665 Russia*

[2] *Melnichenko Foundation, Novomoskovsk Talent Center. Novomoskovsk 301650 Russia*

E-mail: rezvovyug@mail.ru

Abstract: For acousto-optical polarization-independent modulation of radiation, it is proposed to use an axial geometry in paratellurite. In this case, the interacting light waves propagate symmetrically near the optical axis, and the ultrasound propagates without drifting along the axis [110], which is essential for creating compact devices. A fundamental feature of the chosen geometry is the unavoidable synchronization mismatch, which limits the maximum interaction length (the length of

the transducer). It has been shown that the use of the remodulation mode mitigates this limitation, allowing the length of the transducer to be increased by approximately three times.

Keywords: anisotropic acousto-optic diffraction, acousto-optic modulator, light polarization, paratellurite, axial geometry, intermodulation regime

PACS: 42.79.Jq, 43.35.Sx

Введение

Акустооптика (АО) исследует явления, происходящие при взаимодействии электромагнитного излучения с упругими волнами, распространяющимися в прозрачной среде [1-5]. АО-технологии используются для управления параметрами оптического излучения в широком диапазоне длин волн. Известно, что для высокоэффективной дифракции в оптически анизотропной среде падающий свет должен иметь строго определенную поляризацию. Большинство используемых лазеров не обладают таким свойством, поэтому создание поляризационно-независимых АО-устройств остается актуальной задачей.

Современная прикладная акустооптика широко использует монокристалл парателлурита. В этом кристалле наибольшая АО-эффективность достигается, когда медленная поперечная звуковая волна распространяется вблизи оси [110], а взаимодействующие световые волны — вблизи оптической оси. Акустическая анизотропия парателлурита столь велика, что при отклонении от оси [110] на несколько градусов возникает снос звука в десятки градусов. Поэтому, только при направлении звука вдоль оси [110] размер АО-устройства на парателлурите будет самым компактным. В данной работе анализируется вариант поляризационно-независимой АО-модуляции, основанный на особенностях аксиальной геометрии в парателлурите.

1 Геометрия взаимодействия

Вследствие оптической активности поверхности волновых векторов обыкновенной $\mathbf{k}_o$ и необыкновенной $\mathbf{k}_e$ волн вблизи оптической оси имеют небольшой зазор. Его величина $k_e(\theta) - k_o(\theta)$ практически неизменна при углах отклонения до $\theta \cong 1°\text{-}2°$ от оптической оси, но зависит от длины световой волны λ. На рисунке 1 представлена геометрия АО-модулятора неполяризованного света, основанная на этой особенности.

Для уменьшения потерь света при отражении желательно нормальное падение света на входную грань кристалла. Так как волновые векторы взаимодействующих световых волн симметричны относительно оптической оси, то она является нормалью к этой грани. При падении неполяризованного света внутри кристалла возникают две оптические поляризационные моды с волновыми векторами $\mathbf{k}_{0o}$ и $\mathbf{k}_{0e}$, при этом их проекции на

оптическую ось [110] одинаковы: $k_{0o}\sin\theta_o = k_{0e}\sin\theta_e$. Важно, что различие углов θ_o и θ_e много меньше самих углов, поэтому $\theta_{o,e}$ на рисунке и далее в тексте фактически означает любой из них.

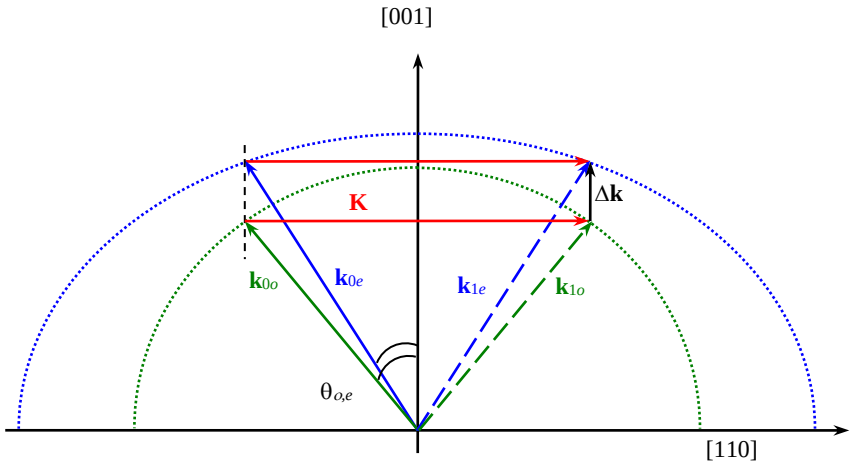


Рис. 1. Векторная диаграмма варианта модуляции неполяризованного света

При такой геометрии взаимодействия разрешена дифракция только со сменой оптической моды. Из рисунка видно, что в этом случае невозможен режим точного синхронизма. Векторные диаграммы одновременного взаимодействия $\mathbf{k}_{0o}$ -> $\mathbf{k}_{1e}$ и $\mathbf{k}_{0e}$ -> $\mathbf{k}_{1o}$ в оптимальном симметричном случае имеют вид: $\mathbf{k}_{0e} + \mathbf{K} = \mathbf{k}_{1o} - \Delta\mathbf{k}$, $\mathbf{k}_{0o} + \mathbf{K} = \mathbf{k}_{1e} + \Delta\mathbf{k}$. Здесь $\mathbf{k}_{1o}$ и $\mathbf{k}_{1e}$ – волновые векторы оптических мод в первом порядке дифракции, $\mathbf{K}$ – волновой вектор звука, $\Delta\mathbf{k}$ – вектор расстройки, направленный вдоль оптической оси. Изменение частоты звука (при неизменности остальных параметров) приводит к уменьшению расстройки для одной моды и увеличению для другой. Поэтому рис. 1 даёт оптимальные условия для совместной дифракции обеих мод.

2 Ограничение длины преобразователя

Пусть источником звука служит преобразователь, длина которого L (вдоль оптической оси) и высота H (определяет световую апертуру). В плосковолновом приближении эффективность дифракции (предполагается брэгговский режим) имеет вид

$$\eta = \frac{v^2}{v^2 + (\Delta kL)^2} \sin^2\left(\frac{1}{2}\sqrt{v^2 + (\Delta kL)^2}\right), \qquad (1)$$

где v – параметр Рамана-Ната, определяющий связь между акустическими и оптическими волнами. Этот параметр связан с акустооптическим качеством материала M_2, и акустической мощностью P_s соотношением

$$\nu = \frac{\pi}{\lambda}\sqrt{2M_2 P_s \frac{L}{H}}\,. \qquad (2)$$

Рисунок 2 визуализирует зависимость (1) от двух безразмерных параметров ν и ΔkL.

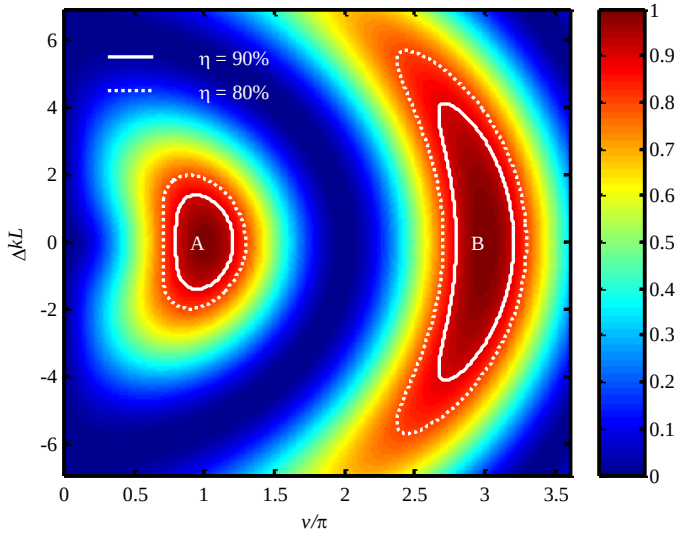


Рис. 2. Зависимость эффективности дифракции от параметра Рамана-Ната ν и безразмерной расстройки ΔkL. Контуры нанесены для эффективности $\eta = 0.9$ (сплошная линия) и 0.8 (пунктир). *A* и *B* – области первого и второго максимумов

Обычно для высокоэффективной дифракции используется область *A*, центр которой соответствует нулевой расстройке $\Delta kL = 0$ и значению параметра Рамана-Ната $\nu = \pi$. Увеличив значение параметра ν примерно в три раза, можно наблюдать следующий максимум (область *B* – режим перемодуляции). Режим перемодуляции требует повышенной акустической мощности, но даёт интересные особенности. В частности, форма области эффективной дифракции меняется, контуры перестают быть выпуклыми, расширяется допустимый диапазон расстройки.

Наличие неустранимой расстройки определяет важную особенность. В пространственном спектре звука должны быть существенные составляющие с векторами $\mathbf{K} \pm \Delta\mathbf{k}$. Диаграмма направленности прямоугольного преобразователя такова, что угол между нормалью к преобразователю и первым минимумом спектра составляет величину $2\pi/KL = \Lambda/L$, где Λ – длина звуковой волны. С другой стороны, из векторной диаграммы, необходимый угол между $\mathbf{K}$ и $\mathbf{K} \pm \Delta\mathbf{k}$ составляет $\Delta k/2K = \Lambda\delta n/2\lambda$, где δn – малая разница показателей преломления оптических мод. Отсюда следует, что длина преобразователя L должна быть много меньше величины $2\lambda/\delta n$. Эти оценки, справедливые при использовании области *A* на рис. 2, существенно ограничивают размер L.

3 Вариант решения

Использование режима перемодуляции расширяет допустимое значение расстройки и увеличивает максимальную длину преобразователя. Проведем сравнение для эффективности дифракции 90%. В обычном режиме наибольшее значение расстройки составляет $\Delta kL \cong 1.4$ и достигается при $v \cong 3$. При переходе к режиму перемодуляции оба параметра увеличиваются до значений $\Delta kL = 4.1$ и $v \cong 8.5$, то есть примерно в 3 раза.

Следующий рисунок 3 иллюстрирует, как использование режима перемодуляции увеличивает допустимую длину преобразователя.

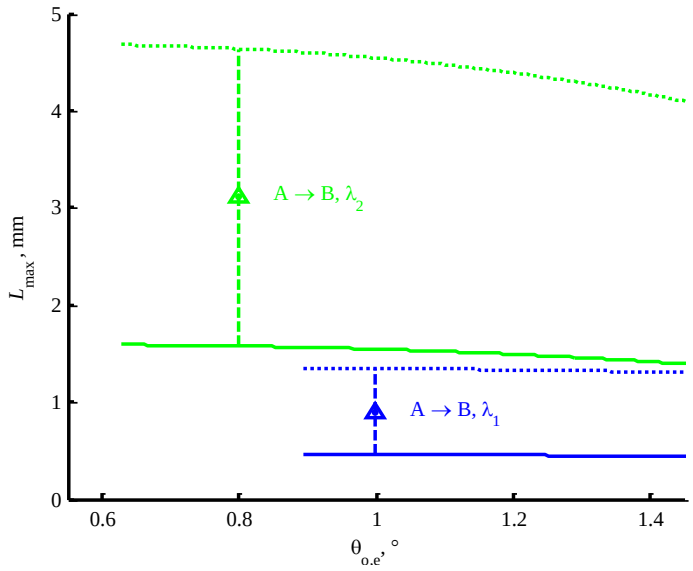


Рис. 3. Увеличение предельной длины преобразователя при переходе к режиму перемодуляции. Длина световой волны $\lambda_1 = 0.63$ мкм, $\lambda_2 = 1.06$ мкм

Расчет проведен в некотором интервале углов $\theta_{o,e}$ для двух длин волн. Представленные графики начинаются со значений углов, соответствующих условной границе брэгговского режима $K^2 L_{\max}/k_{o,e} \cong 10$ в обычном режиме дифракции. Видно, что использование режима перемодуляции смягчает ограничение длины L почти в три раза. Можно отметить, что при увеличении углов $\theta_{o,e}$ допустимый размер начинает уменьшаться. Это обусловлено переходом от гиротропного расщепления оптических мод (разница показателей преломления $\delta n \cong \text{const}$) к типичной для одноосного кристалла картине (δn быстро растет при отклонении от оптической оси).

Рассмотрим особенности потребляемой акустической энергии. Так как плотность акустической мощности (интенсивность звука) равна $p_s = P_s/LH$, то формулу (2) можно переписать в виде

$$2M_2 p_s = \left(\frac{v\lambda}{\pi L}\right)^2.$$

Так как рассмотренный переход к режиму перемодуляции примерно равным образом увеличивает безразмерные параметры ΔkL и v, то отношение v/L меняется слабо. Поэтому, как следует из последнего выражения, также практически не изменится плотность акустической мощности. Акустическая мощность при этом вырастет пропорционально длине преобразователя, примерно в 3 раза.

Для выбранных параметров расчета плотность составляет оценочно 70 Вт/см^2 при длине волны $\lambda_1 = 0.63$ мкм, и 20 Вт/см^2 при длине волны $\lambda_2 = 1.06$ мкм. Акустическая мощность при высоте преобразователя в 4 мм в режиме перемодуляции составит 3-4 Вт для обеих длин волн. В работе [6] реализован метод, который позволяет длительно работать при такой высокой мощности в режиме перемодуляции.

Заключение

Предложенная геометрия АО-взаимодействия в парателлурите может быть использована для поляризационно-независимой модуляции лазерного излучения. Этот вариант имеет следующие особенности.

1. Неустранимая расстройка синхронизма накладывает ограничение на максимальную длину взаимодействия (длину преобразователя). Чем меньше длина волны света, тем сильнее ограничение.

2. Использование режима перемодуляции смягчает ограничение, позволяя увеличить длину преобразователя примерно в 3 раза.

3. При этом увеличение длины пропорцонально увеличивает акустическую мощность. Оценочно необходимая акустическая мощность составляет несколько Ватт.

Список литературы

1. *Магдич Л.Н., Молчанов В.Я.* Акустооптические устройства и их применение – М.: Сов. Радио, 1978.

2. *Балакший В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е.* Физические основы акустооптики. М.: Радио и связь, 1985. 278 с.

3. *Корпел А.* Акустооптика. М.: Мир, 1993. 238 с.

4. *Молчанов В.Я., Китаев Ю.И., Колесников А.И., Нарвер В.Н., Розенштейн А.З., Солодовников Н.П., Шаповаленко К.Г.* Теория и практика современной акустооптики. М.: МИСиС, 2015.

5. *Котов В.М.* Акустооптика. Брэгговская дифракция многоцветного излучения. – М.: Янус-К, 2016.

6. *Антонов С.Н.* Акустооптический дефлектор с отводом тепла от пьезопреобразователя при акустической изоляции теплоотвода // Акустический журнал. 2019. **65**. № 5. С. 588.

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39631

Акустооптические спектрометры и спектральные оптические индексы

Пожар В.Э., Золотухина А.А.

Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва;

Тел.: +7(495)333-6102; E-mail: vitold@ntcup.ru

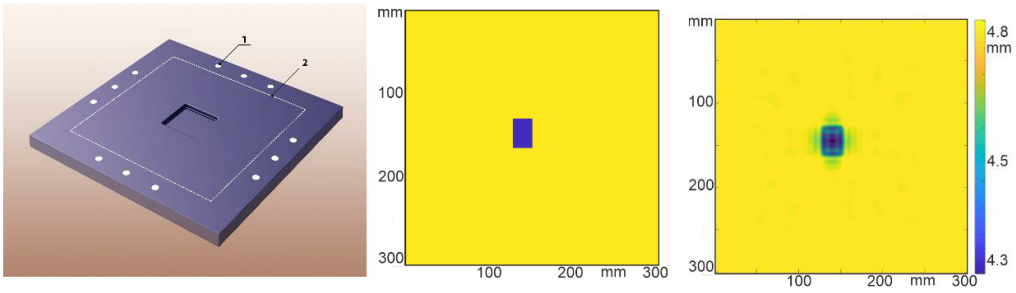
Спектральные индексы, являющиеся комбинацией оптических показателей на разных длинах волн, широко используются в современных задачах оптического бесконтактного оперативного анализа объектов природы и техники. При этом для многих индексов все еще отсутствует единая общепринятая регламентация ключевых параметров применяемых измерительных средств: значений используемых длин волн и ширины спектральных каналов. В то же время современные исследования демонстрируют существенную зависимость вычисляемых значений индексов от указанных параметров, с вариацией значений, достигающей 50%. Один из потенциальных способов решения этой проблемы могло бы стать разработка алгоритма пересчета результатов измерения, полученных любым прибором к значениям «эталонного» прибора с установленными характеристиками.

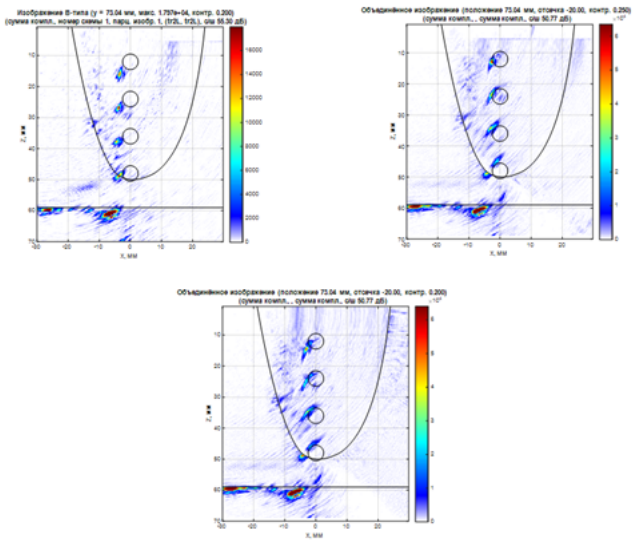
В работе проведено построение аналитической процедуры, сопровождающей такой пересчет и приведение результатов к единому стандарту. Показано, что необходимым условием является наличие информации об аппаратной функции сравниваемых приборов, как рабочего, так и «эталонного», а также о форме спектральной функции измеряемого класса объектов в рабочем диапазоне. Анализ показывает, что уширение спектральных каналов, используемое для повышения отношения сигнал/шум, ведет к снижению контраста, и в результате к падению чувствительности метода. Оптимальная ширина каналов может быть найдена при моделировании с использованием спектрометров на программно-управляемых акустооптических фильтрах.

Ключевые слова: акустооптические перестраиваемые фильтры, спектральный анализ, спектральные оптические индексы

Назад к содержанию секции

Мини-симпозиум 1 Обратные задачи в акустике: современные методы и приложения





назад к Содержанию

МИНИ-СИМПОЗИУМ ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ В АКУСТИКЕ: СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И ПРИЛОЖЕНИЯ

1. МНОГОМЕРНЫЕ ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ АКУСТИКИ: ТЕОРИЯ И АЛГОРИТМЫ
Кабанихин С.И., Шишленин М.А., Новиков Н.С. 963

2. ВОССТАНОВЛЕНИЕ С ПОМОЩЬЮ ПАССИВНОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ТЕРМОМЕТРИИ ТЕМПЕРАТУРЫ МЯГКИХ ТКАНЕЙ НИЖНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ ПОСЛЕ ФИЗИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ
Аносов А.А., Грановский Н.В., Терехов И.И., Лебеденко Е.О., Ерофеев А.В., Попова И.А., Щербаков М.И., Назаров Э.Ф., Беляев Р.В., Мансфельд А.Д., Вахидов Т.М. 964

3. ВОССТАНОВЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ С ПОМОЩЬЮ КОРРЕЛЯЦИОННОГО ПРИЕМА ТЕПЛОВОГО АКУСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ РЕШЕТКОЙ ДАТЧИКОВ
Аносов А.А., Грановский Н.В, Ерофеев А.В., Мансфельд А.Д., Беляев Р.В., Казанский А.С. 970

4. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ ОТРАЖАТЕЛЕЙ В НЕОДНОРОДНЫХ АНИЗОТРОПНЫХ ОБЪЕКТАХ КОНТРОЛЯ
Базулин Е.Г. 976

5. ОБ ОДНОЙ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧЕ ДИАГНОСТИКИ ДЕФЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЛН ЛЭМБА
Беляев А.С., Гончарский А.В., Романов С.Ю. 982

6. ОБ ИТЕРАЦИОННОЙ СХЕМЕ РЕШЕНИЯ ОБРАТНЫХ КОЭФФИЦИЕНТНЫХ ЗАДАЧ ДЛЯ НЕОДНОРОДНЫХ УПРУГИХ ТЕЛ
Ватульян А.О. 988

7. АКУСТИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ НЕОДНОРОДНЫХ ВОЛНОВОДОВ
Юров В.О. 994

8. ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ АНАЛИТИЧЕСКОГО ПОДХОДА
Жарков Д.А., Жостков Р.А. 1000

9. ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА В ОПТОАКУСТИКЕ ОПТИЧЕСКОГО РАЗРЕШЕНИЯ: РАСЧЕТ ПЕРЕДАТОЧНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ИСТОЧНИКА И СФЕРИЧЕСКОГО ПРИЕМНИКА
Чекмарева Д.А., Курников А.А., Клиньшов В.В., Турчин И.В., Субочев П.В. 1001

10. О МЕТОДЕ РЕШЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ ПРИ ПЕРВИЧНОЙ ОБРАБОТКЕ ДАННЫХ В ЗАДАЧЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТОМОГРАФИИ
Новиков Н.С., Кабанихин С.И., Шишленин М.А. 1003

11. УРОВНИ ЧАСТИЧНОЙ ПРОЗРАЧНОСТИ И ТОЧЕЧНЫЕ РАССЕИВАТЕЛИ
Гриневич П.Г., Новиков Р.Г. 1004

12. УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ТОМОГРАФИЯ: ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ И МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ
Шишленин М.А., Новиков Н.С., Кабанихин С.И. 1006

13. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДАННЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ ЗАДАЧ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭЛАСТОГРАФИИ
Чернов В.В., Рычагов М.Н. 1007

14. ДВУХТОЧЕЧНЫЕ ФОРМУЛЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ФАЗЫ
Новиков Р.Г., Сивкин В.Н. 1008

15. ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ АКУСТИЧЕСКОГО РАССЕЯНИЯ С УЧЕТОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МОД В ВОЛНОВОДЕ ОКЕАНИЧЕСКОГО ТИПА
Шуруп А.С., Щербина А.В. 1009

16. ДИНАМИЧЕСКИЕ ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ ДВУМЕРНОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ТОМОГРАФИИ И НЕЙРОННЫЕ СЕТИ
Губер А.В. 1011

17. АКУСТИЧЕСКАЯ ТОМОГРАФИЯ: ПРЯМАЯ И ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА ДЛЯ ДВУМЕРНОГО УРАВНЕНИЯ ЭЙКОНАЛА
Дударь М.Р. 1012

УДК 534 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39632

Многомерные обратные задачи акустики: теория и алгоритмы

Кабанихин С.И.[1)], Шишленин М.А.[1)], Новиков Н.С.[1)]

[1)] *Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск*

Тел.: +7(383)332-0404; E-mail: ksi52@mail.ru

В настоящее время, благодаря площадным системам наблюдений, удалось создать принципиально новый метод решения трехмерных коэффициентных обратных задач, в котором используются: аналог уравнения М.Г. Крейна, параллельные вычисления на высокопроизводительных кластерах, методы Монте-Карло, супербыстрые алгоритмы обращения блочно-теплицевых матриц больших размерностей.

Большинство современных методов решения обратных задач основаны на итерационных процедурах, то даже количество операций, требуемых для проведения нескольких итераций, может привести к неконтролируемым ошибкам. Это обстоятельство осложняется сильной некорректностью обратных задач, которое заключается в неединственности решения, а также в неустойчивости, которая сильно возрастает с глубиной.

Представлен прямой алгоритм численного решения обратной задачи для систем уравнений гиперболического типа в трехмерном пространстве с дополнительной информацией на части полуплоскости.

Основная идея заключается в применении проекционного метода с последующим сведением нелинейной обратной задачи к многопараметрическому семейству линейных интегральных уравнений (многомерный аналог уравнения М.Г. Крейна).

Представлены результаты численных расчетов и сравнительный анализ численных алгоритмов.

Работа выполнена при поддержке РНФ, проект 25-61-00027 "Волновая томография: суперкомпьютерное моделирование, машинное обучение и эксперимент".

Ключевые слова: коэффициентные обратные задачи, акустика, прямые методы, нейронные сети

УДК: 534.6.08 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39633

Восстановление с помощью пассивной акустической термометрии температуры мягких тканей нижних конечностей после физической нагрузки

А.А Аносов[1,2], Н.В. Грановский[1], И.И. Терехов[1], Е.О. Лебеденко[4], А.В. Ерофеев[1,2], И.А. Попова[1], М.И. Щербаков [2], Э.Ф. Назаров[1], Р.В. Беляев[3], А.Д. Мансфельд[3], Т.М. Вахидов[1,4]

[1] *ФГАОУ ВО Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет). 119991, Москва, ул. Трубецкая, д. 8, стр. 2.*

[2] *Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН. 125009 Москва, ул. Моховая, 11/7.*

[3] *Институт прикладной физики РАН. 603950 Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46.*

[4] *Департамент науки и развития Профессионального футбольного клуба «ЦСКА». 125252, г. Москва, ул. 3-я Песчаная, д. 2А.*

E-mail: granovsky_nikita@mail.ru

Аннотация: В настоящее время профессиональные спортсмены (например, футболисты) после тренировок залезают в бочки с холодной водой – их нижние конечности подвергаются гипотермии. Для контроля процедуры предлагается использовать пассивную акустическую термометрию. В пилотном исследовании были измерены временные зависимости акустояркостной температуры и восстановлены с использованием уравнения теплопроводности с кровотоком распределения температуры мышц бедер двух физически активных представителей общей популяции, которые после окончания интенсивной физической нагрузки подвергались процедуре гипотермии, при которой нижние конечности погружали в воду температурой 10°C. Было показано, что значительно (на ~20°C) снижалась только приповерхностная температура бедра, на глубине до 2–3 см. На глубине более 5 см температура практически не отличалась от исходной. Рассчитанная для бедер акустояркостная температура достаточно хорошо согласовалась с экспериментальными данными (стандартное отклонение результатов составляло 0.2 К при усреднении за 10 с). Для проверки точности восстановления температуры был проведен эксперимент с фантомом, температуру внутри которого независимо контролировали. Исследование показало, что

пассивную акустическую термометрию можно использовать для контроля водной гипотермии спортсменов.

Ключевые слова: гипотермия, спортивная медицина, пассивная акустическая термометрия, восстановление распределения температуры, уравнение теплопроводности с кровотоком.

Reconstruction of lower limb soft tissue temperature after physical exercise using passive acoustic thermometry

A.A. Anosov[1,2], N.V. Granovsky[1], I.I. Terekhov[1], E.O. Lebedenko[4], A.V. Erofeev[1,2], I.A. Popova[1], M.I. Shcherbakov[2], E.F. Nazarov[1], R.V. Belyaev[3], A.D. Mansfeld[3], T.M. Vakhidov[1,4]

[1] *I.M. Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University), Ministry of Health of Russia. 8/2 Trubetskaya St., Moscow 119991, Russia.*

[2] *V.A. Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics, Russian Academy of Sciences. 11/7 Mokhovaya St., Moscow 125009, Russia.*

[3] *Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences. 46 Ulyanov St., Nizhny Novgorod 603950, Russia.*

[4] *Department of Science and Development, Professional Football Club CSKA. 2A 3rd Peschanaya St., Moscow 125252, Russia.*

Abstract: Currently, professional athletes (e.g., football players) immerse themselves in barrels of cold water after training, subjecting their lower limbs to hypothermia. To monitor this procedure, the use of passive acoustic thermometry is proposed. In a pilot study, the time dependences of the acoustic brightness temperature were measured. Using the heat equation with blood flow, the temperature distributions in the thigh muscles of two physically active members of the general population were reconstructed. These individuals underwent a hypothermia procedure after intense physical exertion, during which their lower limbs were immersed in water at a temperature of 10°C. It was shown that only the surface temperature of the thigh decreased significantly (by ~20°C), down to a depth of 2–3 cm. At depths greater than 5 cm, the temperature remained practically unchanged from its initial value. The acoustic brightness temperature calculated for the thighs was in fairly good agreement with the experimental data (the standard deviation of the results was 0.2 K with a 10-second averaging time). To verify the accuracy of the temperature reconstruction, an experiment was conducted with a phantom, whose internal temperature was independently monitored. The study demonstrated that passive acoustic thermometry can be used to monitor water hypothermia therapy in athletes.

Keywords: hypothermia, sports medicine, passive acoustic thermometry, temperature distribution reconstruction, bioheat transfer equation with blood perfusion.

PACS: 43.35.Ud

Введение

В спортивной медицине важен контроль температуры тела. Неинвазивная пассивная акустическая термометрия (ПАТ) регистрирует тепловое акустическое излучение тканей, позволяя измерять температуру на глубине до 8 см.

Цель работы — измерение динамики акустояркостной температуры (АТ) и восстановление распределения температуры в бедре у двух спортсменов после нагрузки в процессе гипотермии.

1 Материалы и методы

1.1 Протокол исследования

В данном исследовании приняли участие двое спортсменов мужского пола: участники А и В. До и после нагрузки измеряли поверхностную температуру бедер. Через три минуты после нагрузки начиналась процедура гипотермии: погружение нижних конечностей на пять минут в бочку с водой температурой 10.5 ± 0.5°C. При проведении гипотермии измерялась АТ мягких тканей нижних конечностей. После окончания повторно измерялась поверхностная температура бедер.

1.2 Экспериментальная установка

Для измерений теплового акустического излучения был использован многоканальный акустотермограф [1]. Поверхностная температура измерялась компьютерным термографом ИРТИС-2000.

1.3 Математическая модель

Для описания распределения температуры в бедре используем модель бесконечного цилиндра. Уравнение теплопроводности с учётом кровотока в цилиндрических координатах:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a^2 \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r}\right) - \eta(T - T_0), \qquad 1$$

где T – температура, a^2 – коэффициент температуропроводности, η – кровоток, $T_0 = 37$°C – температура притекающей крови, r – радиус, t – время, $a^2 = \text{const}$, $\eta = \text{const}$.

Начальным распределением температуры является решение стационарного варианта уравнения 1 – модифицированного уравнения Бесселя:

$$T(t = 0, r) = T_0 - \left(T_0 - T_{surf}\right)\frac{I_0\left(\sqrt{\eta/a^2}r\right)}{I_0\left(\sqrt{\eta/a^2}r_0\right)}, \qquad 2$$

где $I_0(r)$ – модифицированная функция Бесселя первого рода, r_0 – радиус бедра, T_{surf} – поверхностная температура до гипотермии. Граничные условия определяются следующим образом: $\frac{\partial T(t,r)}{\partial r}\Big|_{r=0} = 0$, $-\lambda \frac{\partial T(t,r)}{\partial r}\Big|_{r=r_0} = \alpha(T(t,r_0) - T_m)$ – условие Ньютона. Здесь λ – коэффициент теплопроводности, α – коэффициент теплоотдачи, T_m – температура воды. Уравнение 1 решали численно.

Измеряемая величина – АТ объекта, равная температуре акустического черного тела, создающего такую же плотность потока теплового акустического излучения, как и исследуемый объект, определяется интегралом:

$$T_A(t) = \gamma \int_0^\infty T(t,x) \exp(-\gamma x)\, dx, \qquad 3$$

где координата x $(0 \le x \le 2r_0)$ направлена от поверхности вглубь бедра, распределение температуры вдоль оси x определяется выражением $T(x) = \begin{cases} T(r_0 - x), & 0 \le x \le r_0 \\ T(x - r_0), & x > r_0 \end{cases}$, γ – коэффициент поглощения ультразвука по интенсивности. Будем считать, что исследуемая среда однородна по поглощению $\gamma = \text{const}$.

2 Результаты и обсуждение

2.1 Поверхностная температура

ИК-измерения проводились до нагрузки, а также непосредственно до и после гипотермии. У обоих участников была обнаружена тенденция к снижению поверхностной температуры на 1.0 ± 0.3°C после физической нагрузки и на 14.0 ± 0.2°C после гипотермии (рис. 1), из-за перераспределения кровотока.

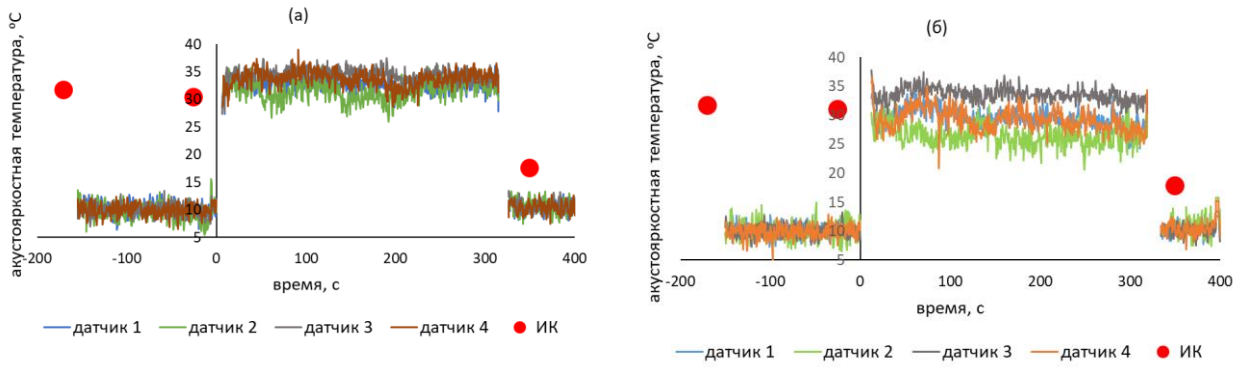


Рис. 1. Временные зависимости акустояркостной температуры бедер двух участников А (а) и В (б). Усреднение АТ 0.5 с. Погрешность измерения ИК температуры меньше размера маркера.

2.2 Акустояркостная температура (АТ)

Динамика АТ (рис. 1) показывает её падение в процессе гипотермии на 0.5–1.5°C. Конечная поверхностная температура (17.6°C) выше температуры воды, но ожидаемо ниже средней АТ (~34°C), что отражает интегральный вклад глубоких тканей.

2.3 Распределение глубинной температуры бедра

Поверхностная температура и радиус бедра участников А и В были 30.39, 30.94°C и 8.8, 8.1 см, соответственно. Кровоток $\eta = 6.3 \cdot 10^{-4}$ 1/с и коэффициент температуропроводности $a^2 = 1.25 \cdot 10^{-3}$ см^2/с для обоих участников соответствовали литературным данным. Параметр $\sqrt{a^2/\eta} = 14$ мм – характерный размер переходной области, в которой температура меняется от поверхностной до глубинной (37°C).

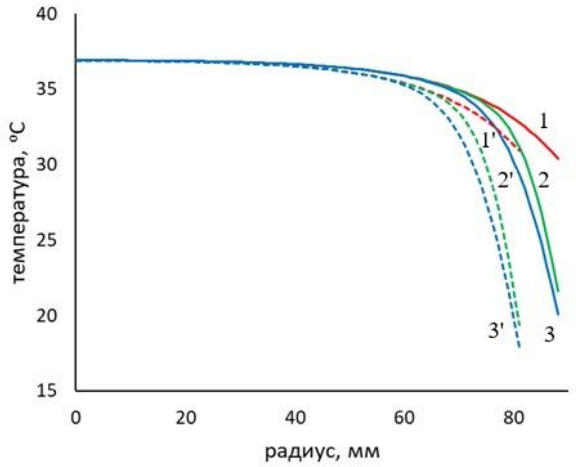


Рис. 2. Расчетные распределения температуры мягких тканей нижних конечностей участников А (сплошные линии) и В (пунктирные линии) перед гипотермией (1, 1’), через 150 с после начала гипотермии (2, 2’) и в конце процедуры (3, 3’).

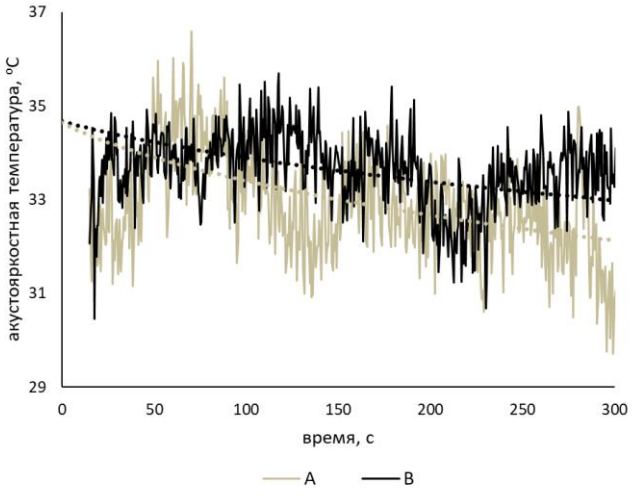


Рис. 3. Экспериментальные (сплошные линии) и расчетные (пунктир) временные зависимости акустояркостной температуры в процессе гипотермии участников А и В. Усреднение АТ 0.5 с.

Распределения температуры при гипотермии были получены путем численного решения уравнения 1. Температура воды составляла 10.5°C, параметры r_0, η и a^2 не менялись, коэффициент теплопроводности у обоих участников $\lambda = 5 \cdot 10^{-3}$ Вт/(м · К) соответствовал литературным данным. Подбором коэффициентов теплоотдачи (α = 0.009 и 0.013 Вт/(м²·К) для участников А и В) и поглощения ультразвука (γ = 0.32 и 0.38 см⁻¹) достигнуто соответствие экспериментальной (~18°C) и модельной поверхностной температуры, а также хорошее согласие рассчитанной и измеренной АТ (рис. 3). Полученные значения γ лежат в диапазоне литературных данных для мышц и кожи.

Расчетные данные хорошо согласуются с экспериментом.

Заключение

Проведенное исследование имеет ограничения, которые следует устранить в будущем. Во-первых, необходимы данные об АТ в контроле, перед началом физической нагрузки. Во-вторых, необходимо получить данные о динамике восстановления температуры спортсменов после гипотермии. В-третьих, отметим малый размер выборки и отсутствие групп сравнения.

Работа профинансирована Министерством науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания ИПФ РАН, проект № FFUF-2024-0037, а также в рамках госзадания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН FFWZ-2025-0013. Сотрудники ИПФ РАН разработали многоканальный акустотермограф. Измерения и расчеты проведены сотрудниками ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН и Сеченовского университета.

Список литературы

1. *Мансфельд А.Д.* Акустотермометрия. Состояние и перспективы. Акустический журнал. 2009;55(4-5):536-547. doi: 10.1134/S1063771009040125

УДК: 534.8 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39634

Восстановление распределения температуры с помощью корреляционного приема теплового акустического излучения решеткой датчиков

А.А. Аносов[a, b], **Н.В. Грановский**[a], **А.В. Ерофеев**[a, b], **Р.В. Беляев**[c], **А.Д. Мансфельд**[c], **А.С. Казанский**[a]

[a] *ФГАОУ ВО Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет)*

119991, Москва, ул. Трубецкая, д. 8, стр. 2;

[b] *Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН*

125009 Москва, ул. Моховая, 11/7

Тел.: (495) 624-52-85; Факс: (495) 624-52-85;

[c] *Институт прикладной физики РАН*

603950 Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46.

Тел.: (8(999)8211008); Факс: (+7 (495) 609-14-00, доб 22-32,22-31)

E-mail: granovsky_nikita@mail.ru

Ранее экспериментально была показана возможность локализации источника теплового акустического излучения с помощью корреляционного приема. В настоящей работе экспериментально показана возможность восстановления распределения температуры с помощью корреляционного приема. Для этого использовалась приемная решетка из четырёх датчиков. В качестве источника использовали два охлажденных относительно окружающей среды тефлоновых цилиндра диаметром 8 мм, расстояние между которыми было 19 мм, находившихся на расстоянии 510 мм от решетки датчиков размером 13 мм. Полоса пропускания датчиков составляла 1.8± 0.6 МГц. При восстановлении суммировались пространственные корреляционные функции, рассчитанные для трех датчиков. Для проверки при заданной геометрии эксперимента было рассчитано изображение источника. Экспериментальное и рассчитанное изображения совпадали с учетом погрешности измерений. Это доказывает возможность восстановления распределения температуры с помощью корреляционного приема методом суммирования корреляционных функций.
Ключевые слова: корреляционная функция, тепловое акустическое излучение, корреляционная акустояркостная температура, восстановление температуры

Reconstruction of temperature distribution using correlation reception of thermal acoustic radiation by a sensor array

A.A. Anosov[a, b], N.V. Granovsky[a], A.V. Erofeev[a, b], R.V. Belyaev[c], A.D. Mansfeld[s], A.S. Kazansky[a]

[a]Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education I.M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation (Sechenov University)

119991, Moscow, st. Trubetskaya, 8, building 2;

[b]Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences

125009 Moscow, Mokhovaya St., 11/7

Tel.: (495) 624-52-85; Fax: (495) 624-52-85;

[c]Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences

603950 Nizhny Novgorod, Ulyanova st., 46.

Tel.: (8(999)8211008); Fax: (+7 (495) 609-14-00, dob22-32,22-31) (corresponding author)

E-mail:granovsky_nikita@mail.ru

The possibility of localizing a thermal acoustic radiation source using a correlation technique has previously been experimentally demonstrated. In this study, the possibility of reconstructing the temperature distribution using a correlation technique is experimentally demonstrated. A receiving array of four sensors was used for this purpose. The source consisted of two 8-mm-diameter Teflon cylinders, cooled relative to the ambient environment and separated by 19 mm, positioned 510 mm from the 13-mm sensor array. The bandwidth of the sensors was 1.8±0.6 MHz. Spatial correlation functions calculated for the three sensors were summed for reconstruction. For verification, an image of the source was calculated for the given experimental geometry. The experimental and calculated images coincided, taking into account measurement error. This demonstrates the possibility of reconstructing the temperature distribution using a correlation technique using the summation of correlation functions.

Key words: correlation function, thermal acoustic radiation, correlation acoustic brightness temperature, temperature recovery

PACS: 43.35. Ud

Введение

Для измерения глубинной температуры тела применяются МР-термометрия, микроволновая радиометрия, мониторинг изменения скорости звука и пассивная акустическая термометрия. Последняя основана на анализе теплового акустического излучения, возникающего из-за случайных колебаний давления в тканях. По спектру этих шумов можно восстановить внутреннее температурное поле без внешнего воздействия [1]. Согласно теореме Ван Циттерта-Цернике, тепловое излучение коррелировано, что позволяет использовать корреляционную обработку для повышения разрешениям [2]. В работах показано, что с помощью парных и многоэлементных датчиков можно точно локализовать источники теплового акустического излучения и реконструировать температурные распределения. Цель доклада — экспериментально подтвердить возможность восстановления сложных температурных профилей с двумя минимумами по методике.

Полученные результаты стали возможными во многом благодаря совместной работе коллективов Института радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН и Института прикладной физики РАН.

Материалы и методы

Для измерений теплового акустического излучения использовался многоканальный акустотермограф ИПФ РАН (разработчик А. Д. Мансфельд) с полосой пропускания 1,8 ± 0,6 МГц, пороговой чувствительностью 0,2 К (интегрирование 10 с) и 4-канальным 14-разрядным АЦП ADM 414x65M (частота дискретизации 15 МГц). В эксперименте применялась линейная решётка из трёх круглых пьезодатчиков диаметром 13,3 ± 0,3 мм (расстояние между центрами 16,0 ± 0,5 мм), размещённых в аквариуме с водой. Датчики были направлены на источник S на расстоянии z 510 ± 2 мм. Измерение длилось 1 с и повторялось 4 раза.

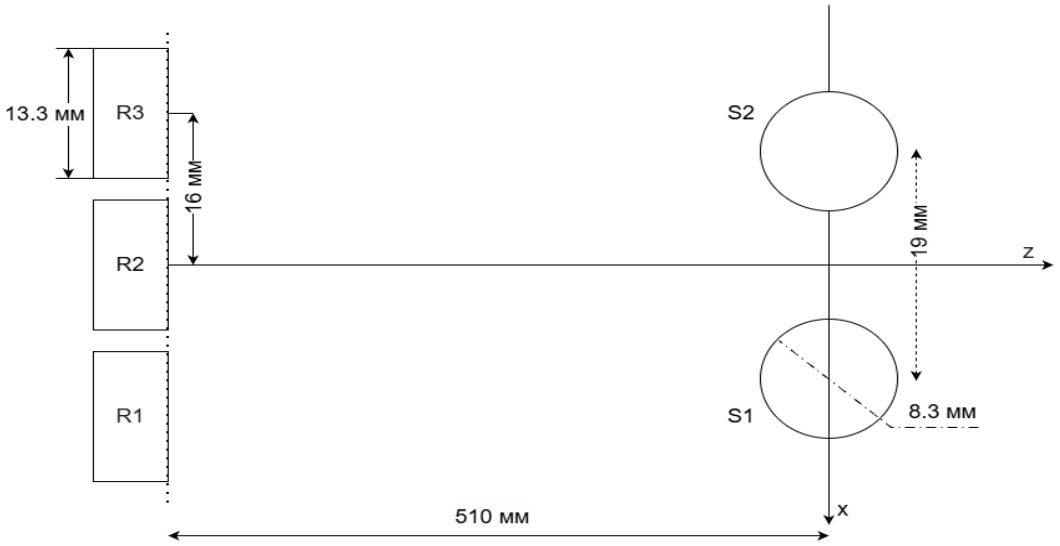


Рис. 1. Схема корреляционного приема теплового акустического излучения решеткой из трех датчиков - R1, R2, R3; S1, S2 – положения цилиндров источника, x – ось, на которой располагались центры цилиндров, z – акустическая ось решетки датчиков.

Согласно [3] корреляционную функцию теплового акустического излучения

$$K(\tau) = \overline{p_1(t)p_2(t+\tau)} - \overline{p_1(t)}\,\overline{p_2(t)},$$

для схемы, показанной на рис. 1, можно выразить в градусах. Это позволяет ввести корреляционную акустояркостную температуру $T_{CA}(\tau) \sim K(\tau)$:

$$T_{CA}(\tau) \sim T_0 \frac{\sin\left[\pi\frac{\Delta f}{f_0}\left(\frac{Dx_0}{\lambda\, z} - f_0\tau\right)\right]}{\pi\frac{\Delta f}{f_0}\left(\frac{Dx_0}{\lambda\, z} - f_0\tau\right)} \frac{\sin\left(\pi\frac{D\Delta x}{\lambda\, z}\right)}{\pi\frac{D\Delta x}{\lambda\, z}} \cos\left[2\pi\left(\frac{D}{\lambda}\frac{x_0}{z} - f_0\tau\right)\right], \quad (1)$$

Был предложен метод восстановления температурного распределения $T(x)$ с помощью корреляционных функций $T_{CA}(\tau)$, полученных парами датчиков, находящихся на разном расстоянии D друг от друга.

$$T(x) \sim \sum_i D_i\, T_{CA}(x|D_i), \quad (2а)$$

$$x = c\tau z / D_i, \quad (2б)$$

Результаты и обсуждение

Для анализа восстановления температурного распределения построены пространственные спектры для соседних и крайних датчиков (рис. 3). Переход от частоты f к пространственной частоте F осуществлялся с помощью соотношения $F = \frac{Df}{\lambda z f_0}$. На рис. 2 видно, что для крайних датчиков пространственная частота удваивается. Спектр мощности

источника (двух нагретых стержней) пропорционален выражению $\frac{\sin \pi F \Delta x}{\pi F \Delta x} \cos \pi F x_0$. Из рис. 2 видно, какую часть спектра источника удалось восстановить в условиях эксперимента.

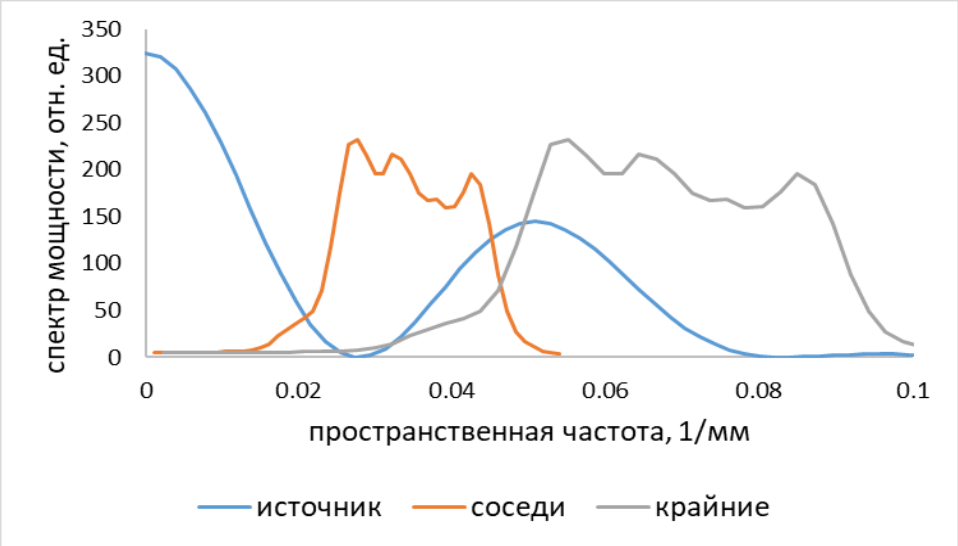


Рис. 2. Пространственные спектры соседних и крайних датчиков и спектр источника.

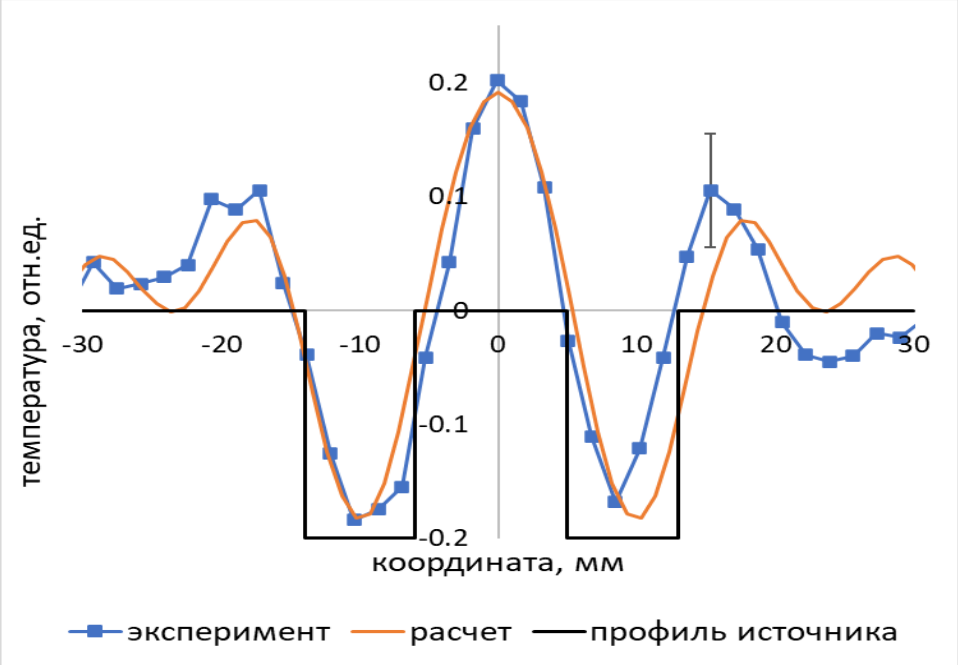


Рис. 3. Пространственные распределения температуры: полученное в эксперименте, расчетное и реальный профиль температуры.

С учётом геометрии эксперимента по формуле (1) рассчитаны кросскорреляционные функции для соседних и крайних датчиков (рис. 4). Временной сдвиг преобразован в координаты по формуле (2б). Температурное распределение получено суммированием весовых коэффициентов кросскорреляционных функций. Рассчитанный профиль (рис. 3) хорошо

совпадает с экспериментом, с учётом возможных ошибок измерений.

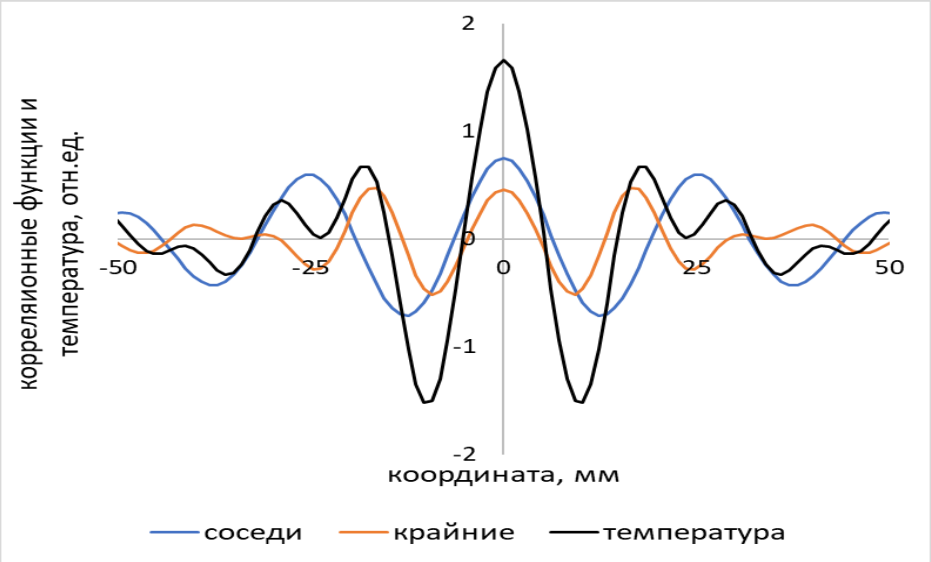


Рис. 4. Расчетные пространственные кросскорреляционные функции соседних и крайних датчиков и распределение температуры, полученное суммированием с указанными в тексте весами данных кросскорреляционных функций.

Заключение

В ходе исследования с помощью корреляционного приёма теплового акустического излучения был восстановлен сложный температурный профиль с двумя минимумами. Это достигнуто суммированием корреляционных функций, измеренных отдельными датчиками, и подтверждено расчётами по геометрии эксперимента. Сравнение экспериментальных данных с моделированием показало их совпадение в пределах точности измерений. Реконструкция профиля с двумя экстремумами доказывает принципиальную возможность восстановления температурного распределения этим методом, при условии повышения точности количественного определения абсолютных значений температуры.

Литература

1. Passechnik V.I., Anosov A.A., Bograchev K.M. Fundamentals and prospects of passive thermoacoustic tomography // Critical Reviews™ in Biomedical Engineering. 2000. 28(3&4). P. 603–640.
2. Zernike, F. (1938). The concept of degree of coherence and its application to optical problems. Physica, 5(8), 785-795.
3. Есепкина, Н. А., Корольков, Д. В., & Парийский, Ю. Н. (1973). Радиотелескопы и радиометры.

УДК: 620.179.16 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39635

that differ only in the crystallite rotation angle. Alternatively, the MINA model can be used to analytically describe the crystallite rotation angles as a function of coordinates. By comparing the signals reflected from the bottom of the sample measured by two or one antenna array with the Kirchhoff-based bottom signals, it is possible to estimate the crystallite rotation angles and elastic coefficients of the weld metal region for a given symmetry type. When working with the MINA model, it is possible to estimate its parameters and elastic coefficients. The proposed approach has been demonstrated in model experiments.

Keywords: Full Matrix Capture (FMC), Total Focusing Method (TFM), digital aperture focusing (DAF), heterogeneous anisotropic medium, MINA model.

PACS: 43.35.Zc

Введение

В настоящее время для восстановления изображения отражателей в объекте контроля используются метод цифровой фокусировки апертуры (ЦФА) [1], который в отличии от технологии фазированных антенных решеток, позволяет получить изображения отражателей с предельной фокусировкой во всех точках $\mathbf{r}$ области восстановления изображения (ОВИ). Акустические свойства практически любого области наплавленного металла отличаются от акустических свойств основного металла сварного соединения. Когда разница δt времен пробега импульса до точки восстановления изображения для однородного и неоднородного объекта контроля меньше четверти периода рабочей частоты f, то изображения восстановленные в предположении, что среда однородна и изотропна, позволяют обнаружить и оценить тип и размеры отражателя. Но если различие акустических свойств велико, так что $\delta t > 0{,}5/f$, то достоверность ультразвукового контроля снижается из-за ухудшения фокусировки и увеличения уровня шума. Если известны пространственное распределение углов поворота кристаллитов $\theta(\mathbf{r})$ и тензор коэффициентов упругости $C_{ijkl}(\mathbf{r})$, то неоднородные анизотропные свойства материала можно учесть при расчете времен задержек от точки излучения импульса до точки ОВИ и обратно до точки приема, что необходимо для метода ЦФА. В этом случае изображения отражателей будут иметь более высокое разрешение и меньший уровень шума, в сравнении с изображением, полученным в предположении однородной изотропной среды [2, 3]. Проблема заключается в получении значений $\theta(\mathbf{r})$ и $C_{ijkl}(\mathbf{r})$ для конкретного объекта контроля, решению которой посвящена данная статья.

1 Расчет лучей в неоднородной анизотропной среде

1.1 Область с неоднородной анизотропии

Для расчета времени распространяя импульса до заданной точки ОВИ можно воспользоваться методом построения лучевых трубок [4, 5]. Для этого нужно численным образом решить систему дифференциальных уравнений, например, методом Рунге-Кутта, что достаточно сложно с вычислительной точки зрения. Для определения функции $\theta(\mathbf{r})$ в работе [6] была предложена модель, называемая в англоязычной литературе MINA, которая аналитически описывает функцию $\theta(\mathbf{r})$, исходя из геометрических параметров области наплавленного металла и еще двух параметров T и η, определяющих скорость изменения η угла наклона кристаллитов и его значение T на границе области. Типичный вид функции $\theta(\mathbf{r})$, рассчитанный по модели MINA, показан стрелками красного цвета на Рис. 1, а.

1.2 Множество однородных анизотропных областей

Задачу расчета времен задержек можно упростить, представив область сварного соединения в виде набора однородных анизотропных областей, у которых одинаковые коэффициенты упругости, но разные углы наклона кристаллитов (стрелки красного цвета на Рис. 1, б, в). В этом случае расчет траектории луча существенно упрощается.

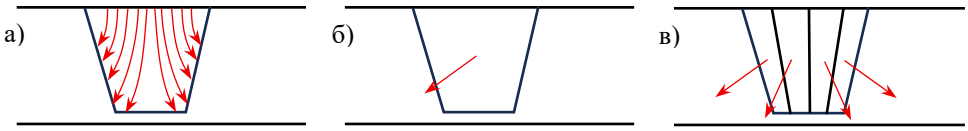


Рис. 1. Распределение углов поворота кристаллитов согласно модели MINA (а), примеры разбиения области наплавленного металла на несколько однородных анизотропных областей (б, в)

Как показал опыт работы, выбор формы областей наплавленного металла, имеет б**о**льшее значение, чем ошибка определения угла наклона кристаллитов.

2 Определение распределения угла поворота кристаллитов

Обозначим через $s_{tr}(t)$ (t – номер излучающей пластины антенной решётки, r – номер регистрирующей пластины) набор эхосигналов, измеренный одной или двумя антенной решеткой, а через $u_{tr}(t;p)$ набор рассчитанных эхосигналов отражённых от дна образца известной толщины в приближении Кирхгофа в зависимости от списка параметров p длиной N. Для модели MINA симметричного шва $p=\{T,\eta\}$, $N=2$, для несимметричного шва $p=\{T_{left},\eta_{left},T_{right},\eta_{right}\}$, $N=4$. Если разделить область наплавленного металла на N областей, то $p=\{\theta_1,\theta_2,\dots\theta_N\}$. При необходимости список параметров p может быть дополнен списком упругих констант. Для кубической симметрии длина списка N увеличится на три, так как она описывается тремя коэффициентами упругости $\{C_{11},C_{12},C_{66}\}$. Определение углов поворота и коэффициентов упругости сводятся к решению оптимизационной задачи

$$p = \arg\min_{p \in \Re^N} \frac{1}{\left| \sum_{t=1}^{N_e} \sum_{r=1}^{N_e} \int s_{tr}(t) u_{tr}(t; p) dt \right|}. \quad (1)$$

Иными словами, ищется то значение списка p длиной N, при котором функция корреляции функций между $s_{tr}(t)$ и $u_{tr}(t; p)$ максимальна. Классические методы, основанные на оценке градиента целевой функции, например, симплексный метод, недостаточно эффективны для решения задачи (1), так как могут прекратить поиск, попав в локальный минимум целевой функции. Биоинспирированные методы [7] эффективнее находят глобальный минимум функций со множеством локальных минимумов.

3 Модельные эксперименты

Система пассивного залива активной зоны (СПЗАЗ) предназначена для отвода остаточных тепловыделений теплоносителя первого контура реактора АЭС. СПЗАЗ относится ко второй ступени пассивных систем безопасности АЭС и контроль качества сварных соединений СПЗАЗ важная задача. На Рис. 2 показана фотография образца с композитным швом, после шлифовки его грани и травления ее кислотой. Граница области наплавленного металла слабо заметна (линия красного цвета), а направления кристаллитов невозможно обнаружить невооруженным глазом. Линией зеленого цвета схематически показана область переходного слоя.

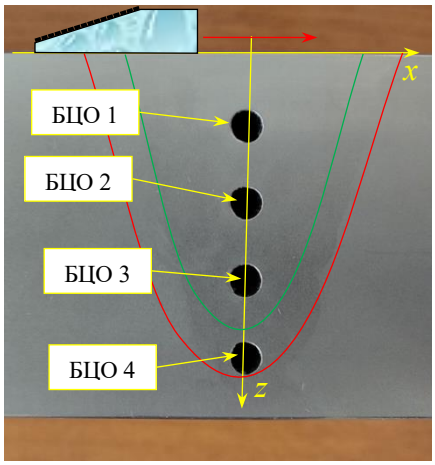


Рис. 2. Вид образца с композитным сварным соединением системы СПЗАЗ

По центру сварного соединения просверлено четыре боковых цилиндрических отверстия (БЦО) диаметром 5 мм. Модельные эксперименты проводились с использованием дефектоскопа АВГУР-АРТ, разработанного и изготовляемого в «Научно-производственном центре «ЭХО+» [8]. Измерения эхосигналов проводились антенной решеткой на 5 МГц из 32 элементов размерами 0.75 мм и зазором между элементами 0.25 мм, установленной на плексигласовую призму с углом наклона 20 градусов. Антенная решетка перемещались с шагом 6 мм по шести положениям, начиная с -30 мм, вдоль стрелки красного цвета (Рис. 2). Изображения отражателей были получены методом ЦФА с учетом когерентного фактора [9].

На Рис. 3, а показано изображение, восстановленное в предположении, что скорость продольной волны в однородной среде равна 5.65 мм/мкс. Хорошо заметны индикации всех четырех БЦО, которые хорошо сфокусированы, но сильно смещены от своего истинного положения – примерно на 5 мм для БЦО 1 и 2. При распространи звука по основному металлу восстановленная индикация дна хорошо совпадает со своим реальным положением. На изображении заметны индикации малой амплитуды, позволяющие определить левую границу области

наплавленного металла. Возможно, что заметны индикации малых амплитуд, соответствующие внутренней границе переходного слоя. При определении коэффициентов упругости и углов поворота кристаллитов предполагалось, что сварное соединение состоит из одной области с кубической анизотропией, границы которой описываются кривыми Безье второго порядка. Применение алгоритма (1) для $p=\{C_{11},C_{12},C_{66},\theta_1\}$ позволило оценить коэффициенты упругости как (211.9, 112.7, 96.9) ГПа, а угол наклона кристаллитов как -140,3 градусов по отношению к оси x. Скорость продольной волны лежит в интервале 5.47 мм/мкс ±5%, что говорит об сильной анизотропии. На Рис. 3, б представлено изображение, восстановленное с учетом определенных анизотропных свойств. Индикации границ всех БЦО совпадают со своими реальными положениями с точностью около 2 мм, что лучше, чем на Рис. 3, а. Применение алгоритма согласно формуле (1) для $p=\{C_{11},C_{12},C_{66}\}$ в предположении, что углы кристаллитов $\theta(\mathbf{r})$ описывается моделью MINA для случая $\{T,\eta\}=\{1,1\}$, позволило оценить коэффициенты упругости как (204.5, 113.3, 99.8) ГПа. Скорость продольной волны лежит в интервале 5.43 мм/мкс ±5.9%. На Рис. 3, в показано изображение, восстановленное с учетом определенных анизотропных свойств для модели MINA. Индикации границ всех БЦО совпадают со своими реальными положениями лучше чем на Рис. 3, а, но хуже, чем Рис. 3, б особенно для БЦО 1 и 2.

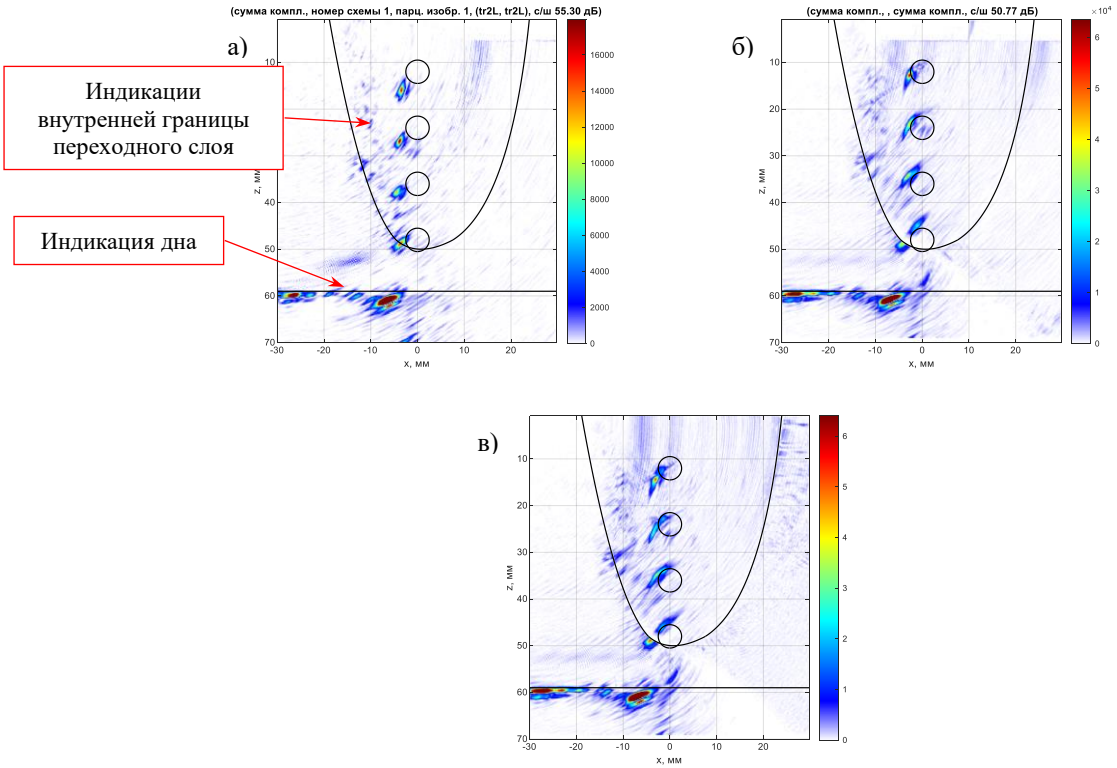


Рис. 3. Изображения БЦО, полученные в предположении однородной среды (а), анизотропной среды (б), при описании углов поворота кристаллитов моделью MINA (в)

Заключение

Для описания неоднородной анизотропной области наплавленного металла предложено заменить ее на небольшое количество однородных анизотропных областей, каждая из которых характеризуется своим углом поворота кристаллитов $\theta(\mathbf{r})$. Для определения $\theta(\mathbf{r})$ и $C_{ijkl}(\mathbf{r})$ предложен метод (1), основанный на достижении минимальной разницы между измеренными сигналами $s_{tr}(t)$ от дна образца и рассчитанными $u_{tr}(t;p)$ согласно списку параметров p. Список параметров может содержать как углы поворота кристаллитов, так и упругие коэффициенты $C_{ijkl}(\mathbf{r})$. При использовании модели MINA в список p включаются параметры $\{T,\eta\}$. В модельных экспериментах после определения углов поворота $\{\theta_1,\theta_2,\dots\theta_N\}$, коэффициентов упругости $\{C_{11},C_{12},C_{66}\}$ или параметров модели MINA $\{T,\eta\}$ удалось получить изображения на который индикации границ БЦО точнее совпадают с их реальным положением (Рис. 3).

Список литературы

1. Бадалян В.Г., Базулин А.Е., Базулин Е.Г., Вопилкин А.Х., Тихонов Д.С. Неразрушающий контроль. Ультразвуковые методы. Цифровые когерентные технологии. Дефектометрия М.: Издательский дом «Спектр», 2025. – 640 с.: ил. ISBN 978-5-4442-0200-5

2. Kolkoori S.R., Rahman M.U., Chinta P.K., Ktreutzbruck M., Rethmeier M., Prager J. Ultrasonic field profile evaluation in acoustically inhomogeneous anisotropic materials using 2D ray tracing model: Numerical and experimental comparison // Ultrasonics. 2013. №2, Vol. 53. P. 396-411. https://doi.org/10.1016/j.ultras.2012.07.006

3. Базулин Е.Г. Учет анизотропных свойств сварного соединения при восстановлении изображения отражателей по эхосигналам, измеренным ультразвуковой антенной решеткой // Дефектоскопия. 2017. №1. С. 11-25.

4. Červený V. Seismic ray theory. New York : Cambridge University Press, 2001. 713 p.

5. Бабич В.М., Киселев А.П. Упругие волны. Высокочастотная теория. Спб. : БХВ-Петербург, 2014. с. 320.

6. Ogilvy J.A. Ultrasonics beam profiles and beam propagation in austenitic weld using a theoretical ray tracing model // Ultrasonics. 1986. №11. P. 337-347.

7. Yang X.S. Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms. Luniver press, 2010, 148 p.

8. Официальный сайт фирмы НПЦ «ЭХО+». — Текст: электронный // ЭХО+. — [Б.м.], [б.и.], [б.г.]. — URL: https://echoplus.ru/ (дата обращения: 01.04.2026).

9. Gongpeng Yang, Zhenggan Zhou, Yang Li, Wenbin Zhou Phase coherence factor-based ultrasonic annulararray testing method for coarse-grained materials // OP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 2770 (2024) 012007. DOI: 10.1088/1742-6596/2770/1/012007

УДК: 534.2: 519.6. DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39636

Об одной обратной задаче диагностики дефектов с использованием волн Лэмба

А.С. Беляев[1,a], А.В. Гончарский[1,b], С.Ю. Романов[1,c]

[1] *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова.*

*НИВЦ МГУ, Ленинские горы, 1, стр. 4, 119234, Москва, Р*оссия.

E-mail: [a] sanyabelyaev240302@mail.ru, [b] gonchar@srcc.msu.ru, [c] romanov60@gmail.com

Аннотация: Статья посвящена разработке методов ультразвуковой томографической диагностики дефектов пластин и труб большого диаметра с использованием волн Лэмба. Предложены эффективные методы диагностики поверхностных дефектов металлических пластин в рамках скалярной волновой модели. В рамках математического моделирования прямая задача распространения волны Лэмба в области, содержащей поверхностный дефект, решается в трехмерной векторной упругой модели. Обратная задача решается как скалярная задача определения толщины пластины как функции от координат в приближении уравнения Гельмгольца для заданного набора частот. Решение обратной задачи строится с помощью градиентной минимизации функционала невязки. Методами математического моделирования показано, что даже измерение одной нормальной компоненты на поверхности пластины достаточно, чтобы реконструировать форму и глубину дефекта. Использование скалярного приближения оказывается весьма эффективным не только, для поиска поверхностных дефектов, но даже и для обнаружения внутренних дефектов. С вычислительной точки зрения предложены методы решения коэффициентных обратных задач для дифференциальных уравнений.

Ключевые слова: ультразвуковая томография, обратные задачи, неразрушающий контроль, волны Лэмба.

On an inverse problem of defect diagnostics using Lamb waves

A.S. Belyaev[1,a], A.V. Goncharsky[1,b], S.Y. Romanov [1,c]

[1] *Lomonosov Moscow State University.*

RCC MSU, Leninskie Gory, 1, build. 4, Moscow 119234, Russia.

E-mail: [a] sanyabelyaev240302@mail.ru, [b] gonchar@srcc.msu.ru, [c] romanov60@gmail.com

Abstract: This report focuses on the development of ultrasonic tomographic diagnostic methods for defects in plates and large-diameter pipes using Lamb waves. Effective methods for diagnosing surface defects in metal plates are proposed within the framework of a scalar wave

model. Using mathematical modeling, the direct problem of Lamb wave propagation in a region containing a surface defect is solved within a three-dimensional vector elastic model. The inverse problem is solved as a scalar problem of determining the plate thickness as a function of coordinates in the Helmholtz equation approximation for a given set of frequencies. The solution to the inverse problem is constructed using gradient minimization of the residual functional. Using mathematical modeling methods, it is shown that even measuring a single normal component on the plate surface is sufficient to reconstruct not only the shape but also the depth of the defect. The use of a scalar approximation proves highly effective not only for detecting surface defects but also for detecting internal defects. From a computational point of view, methods for solving coefficient inverse problems for differential equations are proposed.

Keywords: ultrasound tomography, inverse problems, non-destructive testing, Lamb waves.

PACS: 02.30.Zz, 43.35.Zc:

Введение

Статья посвящен разработке методов ультразвуковой томографической диагностики дефектов металлических пластин и труб с использованием волн Лэмба. Принципиально важной особенностью томографических методов является использование для диагностики прежде всего проходящего через исследуемую область излучения. В этом направлении разрабатываются разные подходы в медицинской диагностике, дефектоскопии, гидро-, сейсмоакустике [1-7]. Одним из интересных направлений ультразвуковой томографии в неразрушающем контроле является Guided Wave Tomography, в которой для диагностики дефектов нарушения толщины пластин, труб большого диаметра, слоистых сред используются волны Лэмба [8-11]. Как и в сейсмике, и в большинстве задач неразрушающего контроля, в Guided Wave Tomography обычно источники и приемники располагаются на поверхности объекта контроля только с одной стороны от объекта-пластины. В сейсмике это обычно приводит к проблемам реконструкции, связанным с ограниченным диапазоном углов зондирования. Специфика распространения волн Лэмба в тонких пластинах не приводит к таким проблемам.

Фазовая скорость волны Лэмба сильно зависит от толщины пластины, в которой она распространяется. Этот эффект приводит к рассеянию волн Лэмба на дефектах в пластинах и позволяет эффективно использовать волны Лэмба при томографической диагностике тонких пластин. Обратная задача решается на основе скалярной модели для уравнения Гельмгольца. В работах [8–10] проведены экспериментальные измерения в лаборатории и визуализация дефектов в пластинах с использованием волн Лэмба для небольшого набора из ~5 частот.

В настоящей статье для диагностики дефектов в модельном эксперименте в отличие от известных работ используется ~40 частот из широкого диапазона частот зондирующего импульса. Минимизация функционала невязки выполняется не последовательно по частотам из

небольшого набора, а одновременно по всем частотам, что правильно с математической точки зрения. Минимизация выполняется с использованием полученного авторами выражения для градиента сразу по всему набору частот. Использование скалярного приближения оказывается весьма эффективным не только для поиска поверхностных дефектов, но даже и для обнаружения внутренних дефектов в пластине.

1 Обратная задача ультразвуковой томографии на волнах Лэмба и ее решение

Рассмотрим обратную задачу ультразвуковой диагностики в пластинах толщиной порядка длины волны зондирующего импульса. В таких пластинах распространяются волны Лэмба. Для диагностики будем использовать волны Лэмба моды A_0, в диапазоне частот, при котором другие моды A_i ($i > 0$) не возникают. Будем считать, что пластина однородна, плотность и коэффициенты Ламе материала пластины известны. Дефект пластины расположен на поверхности и связан с изменением толщины пластины $d(\boldsymbol{r})$ в области дефекта. На рис. 1 приведена схема томографического эксперимента, в которой на поверхности пластины вокруг области с дефектом расположены источники 1 и приемники 2. Вокруг дефектов толщина пластины d_0 постоянна и известна. В ходе эксперимента источники поочередно излучают ультразвуковой импульс, который порождает волну Лэмба моды A_0. Прошедшие через дефект и отраженные волны принимаются всеми детекторами. На детекторах измеряется вертикальная компонента колебаний рассеянных волн Лэмба моды A_0 на поверхности пластины. Полученные экспериментальные данные используются для решения обратной задачи ультразвуковой томографии. Распространение волн в скоростях в упругой объемной пластине описывается гиперболической системы первого порядка в R^3

$$\begin{cases} \rho(\boldsymbol{r})\frac{\partial \boldsymbol{u}(t,\boldsymbol{r})}{\partial t} = div\,\boldsymbol{\sigma}(t,\boldsymbol{r}), \\ \frac{\partial \boldsymbol{\sigma}(t,\boldsymbol{r})}{\partial t} = 2\mu(\boldsymbol{r})\frac{\partial \boldsymbol{\varepsilon}(t,\boldsymbol{r})}{\partial t} + \lambda(\boldsymbol{r})div\,\boldsymbol{u}(t,\boldsymbol{r})\ \boldsymbol{I} + \delta(\boldsymbol{r}-\boldsymbol{q})\boldsymbol{g}(t). \end{cases} \quad (1)$$

Здесь $\boldsymbol{u}(t,\boldsymbol{r})$ - вектор скорости сдвига, $\boldsymbol{\sigma}(t,\boldsymbol{r}) = \sigma_{ij}$ — тензор напряжений размером 3×3; $\boldsymbol{\varepsilon}(t,\boldsymbol{r})$ — тензор деформации, $\boldsymbol{I}$ — единичная матрица; $\mu(\boldsymbol{r})$, $\lambda(\boldsymbol{r})$ — коэффициенты Ламе; $\rho(\boldsymbol{r})$ — объемная плотность; $\boldsymbol{g}(t,\boldsymbol{r}) = g_{ij}$ — тензор, задающий внешнее воздействие; $\delta(x)$ – функция Дирака. Начальные условия являются условиями покоя. Верхнюю и нижнюю стороны пластины будем считать свободной границей, на боковых сторонах пластины ставим условия прозрачности. Источники излучают широкополосный импульс в точках $\boldsymbol{q}$.

Рассмотрим упрощенную постановку обратной задачи для поиска поверхностных дефектов. Обозначим толщину пластины через $d(\boldsymbol{r})$. $d(\boldsymbol{r})$ является функцией точка $\boldsymbol{r}$ на поверхности, и ее требуется найти в обратной задаче. Предположим, что дефект расположен снизу пластины. Для плавно меняющейся функции $d(\boldsymbol{r})$ распространение вертикальных

колебаний на верхней поверхности пластины моды A_0 приближенно будем описывать уравнением Гельмгольца в R^2 для набора частот из спектра зондирующего импульса

$$\Delta_r u(w_i, \boldsymbol{r}, \boldsymbol{q_j}) + \left(w_i / c(\boldsymbol{r}, w_i, d(\boldsymbol{r}))\right)^2 u(w_i, \boldsymbol{r}, \boldsymbol{q_j}) = F\,\delta(\boldsymbol{r} - \boldsymbol{q_j}), \quad (2)$$

где $u(w_i, \boldsymbol{r}, \boldsymbol{q_j})$ – скалярная волна в точке $\boldsymbol{r} \in \boldsymbol{R^2}$ в пластине, w_i – круговые частоты излучения ($i = 1, \dots, N$), $\boldsymbol{q_j} \in \boldsymbol{R^2}$ – положение источника на верхней поверхности пластины ($j = 1, \dots, M$), $c(\boldsymbol{r}, w_i, d(\boldsymbol{r}))$ – скорость волн моды A_0, которая зависит от частоты w_i и толщины $d(\boldsymbol{r})$ пластины в точке $\boldsymbol{r}$ в соответствии с дисперсионным соотношением [12], F – амплитуда источника. На границе расчетной области ставим условие неотражения.

Обратная 2D задача ставится как поиск толщины $\bar{d}(\boldsymbol{r})$, минимизирующей функционал невязки $\Phi(d(\boldsymbol{r}))$, который зависит от толщины $d(\boldsymbol{r})$

$$\Phi(d(\boldsymbol{r})) = \sum_{j=1}^{M} \sum_{i=1}^{N} \int_S \left(u\left(w_i, \boldsymbol{s}, \boldsymbol{q_j}, d(\boldsymbol{r})\right) - U(w_i, \boldsymbol{s}, \boldsymbol{q_j})\right)^2 d\boldsymbol{s}. \quad (3)$$

Здесь $U(w_i, \boldsymbol{s}, \boldsymbol{q_j})$ - экспериментальные данные в частотной области, которые представляют собой преобразование Фурье от вертикальные колебания на верхней поверхности пластины волн Лэмба моды A_0 в местах расположения приемников. Таким образом, в модельных расчетах экспериментальные данные рассчитываются в упругой векторной модели (1) в R^3 во временной области, а интерпретация данных осуществляется в скалярной модели в R^2 для уравнения Гельмгольца (2) для некоторого набора частот.

Градиент функционала (3) в скалярной постановке в R^2 выписывается в виде [11,13]

$$\frac{\delta\Phi(d(\boldsymbol{r}))}{\delta d(\boldsymbol{r})} = \sum_{i=1}^{N} \frac{2c_0^2(w_i)}{c^3(w_i, d(\boldsymbol{r}))} \frac{\delta c(w_i, d(\boldsymbol{r}))}{\delta d(\boldsymbol{r})} \sum_{j=1}^{M} \left(\frac{w_i}{c_0(w_i)}\right)^2 Re\left(u\left(w_i, \boldsymbol{r}, \boldsymbol{q_j}, d(\boldsymbol{r})\right) z\left(w_i, \boldsymbol{r}, \boldsymbol{q_j}, d(\boldsymbol{r})\right)\right), \quad (4)$$

где $z\left(w_i, \boldsymbol{r}, \boldsymbol{q_j}, d(\boldsymbol{r})\right)$ – решение сопряженной задачи, $c(w_i, d(\boldsymbol{r}))$ и ее производную находим из дисперсионного соотношения [12]. Для решения обратной задачи будем использовать итерационные градиентные методы минимизации функционала невязки (3).

2 Модельные расчеты обратной задачи реконструкции дефекта пластин

Расчет прямой задачи производился в векторной упругой модели (1) в трехмерной тонкой стальной пластине (рис. 1) с толщиной $d_0 = 0.48$ см и размером рабочей области 30×30 см. Расчетная сетка рабочей области имеет размер 300×300×50 точек. Использовалось 12 источников на верхней стороне пластины, расположенных на расстоянии 10 см от сторон квадрата рабочей области. По периметру рабочей области в каждой точке расчетной сетки располагались ~1200 приемников на верхней стороне пластины. В рабочей области располагаются дефекты с нижней стороны пластины. В модельном эксперименте дефект имеет форму выемки глубиной $0.1d_0$ на поверхности пластины в виде прямоугольного параллелепипеда. Рабочая область содержится внутри расчетной области размера

800×800×50 точек. Размер расчетной области был выбран так, что отраженная от ее границ волна приходит на приемник позже, чем волна, прошедшая через дефект.

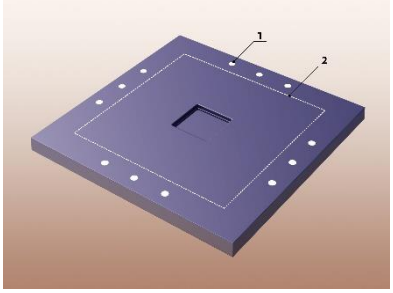
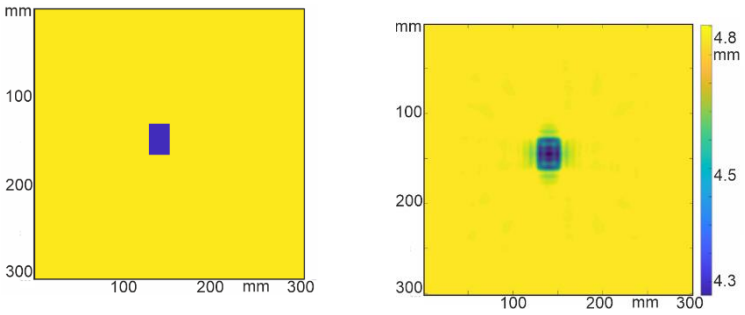


Рис. 1. Схема томографического эксперимента



а *б*

Рис. 2. Модельный эксперимент: а – фантом; б – восстановленное изображение дефекта на поверхности пластины

Решение обратной задачи проводилось с использованием скалярной волновой модели (2) в R^2. Для минимизации функционала (3) использовался градиент (4). В расчете использовалась 41 частота в интервале 23-147кГц. На рис. 2, *а* приведен фантом дефекта. Изображение фантома представляет собой карту толщины пластины $d(\boldsymbol{r})$ в соответствии с цветовой шкалой толщины на рисунке справа. На рис. 2, *б* – восстановленное изображение толщины пластины, когда дефект расположен на поверхности пластины после 50 итераций. Видно, что локализация, форма и глубина дефекта восстанавливается с высокой точностью.

Проводились также предварительные исследования возможности диагностики дефектов, расположенных не на поверхности, а в глубине пластины. Для этих целей небольшой дефект в виде прямоугольного параллелепипеда толщины $0.1d_0$ поместили ровно посередине глубины пластины. При этом расстояние от граней дефекта до сторон пластины составило $0.45\ d_0$. Обратная задача решалась тем же методом, что и в первом эксперименте. Результат реконструкции показал возможность локализация дефекта и реконструкции его формы с высокой точностью. Интерпретировать восстановленное изображение как толщину пластины некорректно, т.к. во этом эксперименте есть толщины сверху и снизу от дефекта (которые в данном эксперименте равны). Волна Лэмба при прохождении дефекта расщепляется на волну сверху и волну снизу от дефекта. Скорость этих волн в области дефекта одинакова. Таким образом, восстанавливается не суммарная толщина пластины $0.9\ d_0$, как в первом эксперименте, а толщина $0.45\ d_0$ сверху (или снизу) дефекта.

Заключение

В статье предложены итерационные методы диагностики поверхностных дефектов металлических пластин в рамках скалярной волновой модели. В рамках математического моделирования прямая задача распространения волны Лэмба решается в векторной упругой модели в R^3. Обратная задача определения толщины пластины как функции от координат решается в R^2 в приближении уравнения Гельмгольца для набора частот.

Показано, что даже измерение одной нормальной компоненты на поверхности пластины достаточно, чтобы реконструировать форму и глубину поверхностного дефекта с высокой точностью. Использование скалярного приближения оказывается весьма эффективным не только, для поиска поверхностных дефектов, но даже и для обнаружения внутренних дефектов. В дальнейшем планируется проведение более подробных исследований реконструкции больших дефектов, расположенных в глубине пластины.

Список литературы

1. *Hopp T., Zapf M., Fernandez-Lago L., Feldbusch F., Gemmeke H., Ruiter N.V.* First imaging results with the new generation of the KIT 3D ultrasound tomography device // Proc. SPIE Medical Imaging 2023: Ultrasonic Imaging, Tomography. SPIE. **12470**. 1247003.
2. *Martiartu N.K., Boehm C., Fichtner A.* 3-D Wave-Equation-Based Finite-Frequency Tomography for Ultrasound Computed Tomography // IEEE T-UFFC, 2020. **67**, № 7. P. 1332–1343.
3. *Буров В.А., Румянцева О.Д.* Обратные волновые задачи акустической томографии. Ч. 2: Обратные задачи акустического рассеяния. Ленанд. М., 2020.
4. *Румянцева О.Д., Шуруп А.С., Зотов Д.И.* Восстановление скорости звука, плотности, коэффициента поглощения и его частотной зависимости в многочастотном режиме томографирования // Акуст. журн. 2025. **71**, № 6. С. 866–880.
5. *Dolgikh G., Bolsunovskii M., Zharkov D., Zhostkov R., Presnov D., Razin A., Shurup A.* Numerical Simulation of Seismoacoustic Wave Transformation at Sea–Land Interface // J. Mar. Sci. Eng. 2024. **12**. P. 2112. https://doi.org/10.3390/jmse12122112.
6. *Bazulin E., Goncharsky A., Romanov S., Seryozhnikov S.* Ultrasound transmission and reflection tomography for nondestructive testing using experimental data // Ultrasonics. 2022. **124**. 106765. https://doi.org/10.1016/j.ultras.2022.106765
7. *Goncharsky A.V., Romanov S.Y., Seryozhnikov S.Y.* On mathematical problems of two-coefficient inverse problems of ultrasonic tomography // *Inv. Probl.* 2024. **40**, № 4. 045026.
8. *Huthwaite, P., Simonetti, F.* High-resolution guided wave tomography // Wave Motion 2013. **50**, № 5. P. 979–993. https://doi.org/10.1016/j.wavemoti.2013.04.004
9. *Rao J., Ratassepp M., Fan Z.* Guided Wave Tomography Based on Full Waveform Inversion // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control 2016. **63**, № 5. P. 737–745.
10. *Zhao X., Rose J.L.* Ultrasonic guided wave tomography for ice detection // Ultrasonics 2016. **67**. P. 212–219. https://doi.org/10.1016/j.ultras.2015.12.005
11. *Belyaev A., Goncharsky A., Romanov S.Y.* Features of Solving Inverse Problems of Guided Wave Tomography on Supercomputers // LNCS 2025. **16196**. P. 133–144.
12. *Викторов И.А.* Ультразвуковые волны Лэмба // Акуст. журн. 1965. **11**, № 1. С. 1–18.
13. *Belyaev A.S., Goncharsky A.V., Romanov S.Y., Voevodin Vad.V.* Supercomputer Methods of Ultrasound Tomographic Imaging in NDT Based on Lamb Waves // Supercomputing Frontiers and Innovations. 2025. **12**, № 4. P. 34‑51. https://doi.org/10.14529/jsfi250403

УДК: 539.3 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39637

Об итерационной схеме решения обратных коэффициентных задач для неоднородных упругих тел

Ватульян А. О.

Южный федеральный университет. Ростов-на-Дону, 344090,Мильчакова 8а, Россия.

E-mail: aovatulyan@sfedu.ru

Аннотация. Создание функционально-градиентных материалов, в которых упругие свойства меняются непрерывным образом, требуют совершенствования способов определения переменных механических свойств, базирующихся на решении обратных коэффициентных задач, в которых входная информация зависит как от способа реализации акустического воздействия, так и от способа снятия отклика на границе тела. В работе изложены способы формулировки операторных соотношений, возникающих при формулировке и решении обратных задач по определению переменных параметров Ляме и плотности, представлено развитие методов выбора начальных приближений, итерационных схем. На основе метода линеаризации сформулированы интегральные уравнения Фредгольма 1-го рода с гладкими ядрами для нахождения поправок и в рамках модифицированного метода регуляризации А. Н. Тихонова построено их решение применительно к конкретным задачам для пластин, стержней, цилиндров. Представлены результаты расчетов, проведен анализ чувствительности.

Ключевые слова: неоднородная упругость, акустический мониторинг, обратная задача, итерационный процесс

On the Iterative Scheme for Solving Inverse Coefficient Problems for Inhomogeneous Elastic Bodies

Vatulyan A. O.

Southern Federal University. Rostov-on-Don, 344090, Milchakova 8a, Russia. E-mail: aovatulyan@sfedu.ru

Abstract. The creation of functionally graded materials, in which the elastic properties change in a continuous way, requires the improvement of methods for determining variable mechanical properties based on solving inverse coefficient problems, in which the input information depends both on the method of implementing acoustic impact and on the method of measuring the response at the body boundary. The paper presents methods for formulating operator relations that arise when formulating and solving inverse problems for determining variable Lamé parameters and density, and presents the development of methods for selecting initial approximations and iterative schemes.

Based on the linearization method, Fredholm integral equations of the 1st kind with smooth kernels are formulated to find the corrections, and their solution is constructed using the modified Tikhonov regularization method for specific problems for plates, rods, and cylinders. The results of calculations are presented, and a sensitivity analysis is performed.

Keywords: heterogeneous elasticity, acoustic monitoring, inverse problem, iterative process

В последние годы активно осуществляется создание новых композиционных материалов, элементы конструкций из которых обладают более высокими прочностными свойствами, чем из однородных материалов. Отметим, что современные композиты приобретают новые качества при армировании различного типа (частицами, волокнами). Вместе с тем часто прочность изделий из композитов такого вида часто снижается в силу мелкомасштабной пространственной неоднородности и возникновения значительной концентрации напряжений на границе раздела фаз. Одно из направлений преодоления такой проблемы связано с созданием функционально-градиентных материалов, физические свойства в которых зависят от координат и меняются в соответствии с некоторыми законами, задаваемыми некоторыми гладкими функциями, которые достаточно просто формируются при изготовлении с помощью 3D-печати. Фактически законы неоднородности формируются в ходе изготовления элементов конструкций, таких как стержни и пластины. Для корректного произведения расчетов для конструктивных элементов из таких материалов на прочность, устойчивость и колебания возникает проблема достаточно точного определения законов изменения от координат упругих характеристик (в изотропном случае это два упругих модуля - характеристики Ляме). В отличие от стандартных прямых экспериментальных подходов, применимых лишь для однородных сред, определение переменных характеристик требует использования специальных схем нагружения и обработки данных отклика, основанных на аналитических методах анализа возникающих обратных коэффициентных задач и соответствующих вычислительных технологиях. Одним из наиболее распространенных способов получения отклика является возбуждение установившихся колебаний при помощи осциллирующей поверхностной нагрузки и снятие информации об амплитудах и фазах смещений на поверхности тела.

Отметим, что коэффициентные обратные задачи теории упругости - интенсивно развивающаяся научная область, находящаяся на стыке математической теории упругости, акустики сред с переменными свойствами, операторных методов исследования возникающих нелинейных некорректных задач, требующая сочетания аналитических средств и развития вычислительных схем, использующих регуляризованные итерационные алгоритмы. К настоящему времени сформированы соответствующие нелинейные операторные уравнения, на основе метода линеаризации которых построены линейные задачи и описаны итерационные процессы на базе обобщенного метода Ньютона [1]. Как правило, задачи такого типа относятся к некорректным задачам, для которых характерны возможная неединственность и сильная неустойчивость отыскиваемого решения по отношению к малым возмущениям входной информации [2-5], которые присущи традиционному инструментарию, используемому в практике акустических измерений.

Наибольшее продвижение, достигнутое на пути сочетания аналитического и численного исследования коэффициентных обратных задач такого типа, достигнуто для одномерных законов неоднородности для λ, μ, ρ [6, 7] при изучении переопределенных краевых задач для стержней при анализе продольных, изгибных и крутильных колебаний, а также для цилиндрических структур [8, 9], для которых функции неоднородности предполагаются одномерными. Дополнительная информация в виде добавочных граничных условий, необходимая для формулировки соответствующих обратных задач, задается обычно при помощи измеренных амплитудно-частотных характеристик в некотором диапазоне частот, расположенном до второго резонанса соответствующей структуры.

Подробный анализ подходов по решению таких задач свидетельствует о том, что ключевым моментом при построении решений является итерационный процесс, на каждом этапе которого необходимо решать прямую задачу и затем находить поправку к начальному приближению, а начальное приближение ищется в простом классе функций (обычно линейном) на базе генетических алгоритмов. Среди итерационных алгоритмов наиболее распространен операторный метод Ньютона и его модификации. В общем случае, когда искомые характеристики зависят от координат, построение решения прямой задачи осуществляется лишь численно — например, методом конечных элементов, конечных разностей или проекционными методами, поскольку явные операторные соотношения, связывающих входные и выходные данные задачи построить невозможно.

Заметим, что важным фактором, определяющим успех итерационных алгоритмов типа операторного метода Ньютона, является выбор адекватного начального приближения, близкого к искомому в некоторой метрике. На практике применяются два основных подхода к его построению. Первый подход базируется на решении серии вспомогательных задач для модели однородного тела, что позволяет определить эффективные или усредненные характеристики исследуемой неоднородной структуры. Второй подход предполагает поиск искомых функций-коэффициентов не среди положительных суммируемых функций, а в более узком классе линейных комбинаций известных функций (например, линейных, экспоненциальных или степенных). На этом этапе параметры модели подбираются путем минимизации функционала невязки между экспериментальными и расчетными данными, что требует многократного решения прямых задач, но позволяет получить физически обоснованную отправную точку для последующей итерационной уточняющей процедуры. Обзор литературы в этом направлении свидетельствует о том, что ряд авторов ограничивается минимизацией функционала невязки, как основным инструментом решения обратной задачи, причем минимизация обычно реализуется при помощи эвристических (эволюционных) алгоритмов. Отметим, что отклик изучаемого объекта в виде смещений на границе тела на приложенную нагрузку, требует дополнительного анализа. При изучении отклика обычно вводится понятие чувствительности [10] с помощью аппарата производных по Фреше [11] от исходных операторов. Изучение чувствительности позволяет выявлять неинформативные комбинации нагружения для выбранной геометрии объекта (например для стержня или цилиндра), при которых отсутствует или практически отсутствует изменение отклика при изменении искомых функций. Так, например, параметр Ламе λ не влияет на деформацию при кручении стержневых структур и соответственно из опыта на кручение не может быть восстановлен. На основе введенного понятия чувствительности можно сформулировать требования к наиболее информативным способам нагружения и измерения АЧХ.

В настоящей работе излагаются некоторые аспекты исследования ряда обратных задач для моделей неоднородной теории упругости, использованию упрощающих схем при реализации вариационных подходов для вытянутых структур при построении операторных соотношений и их использование как при реализации метода интегральных уравнений для анализа обратных задач, так и более простых подходах, связанных с асимптотическим анализом прямых и обратных задач.

Постановка задач. Прямая задача. Рассмотрим установившиеся колебания ограниченной области V с кусочно-гладкой границей $S = S_u \cup S_\sigma$, где на S_u задаются компоненты вектора перемещений, а на S_σ компоненты вектора внешней нагрузки. При этом будем считать, что объект исследования колеблется с частотой ω. Таким образом, общая постановка прямой задачи состоит из уравнений установившихся колебаний

$$\sigma_{ij,j} + \rho\omega^2 u_i = 0 \quad i = 1,2,3 \tag{1}$$

закона Гука $\sigma_{ij} = \lambda u_{k,k}\delta_{ij} + \mu(u_{i,j} + u_{j,i})$, (2)

λ, μ - параметры Ляме, ρ – плотность среды

и граничных условий смешанного типа

$$u_i|_{S_u} = 0, \quad \sigma_{ij} n_j\big|_{S_\sigma} = p_i \tag{3}$$

Обратная задача. Сформулируем задачу 1 определения коэффициентов оператора теории упругости (1)-(3) по дополнительной информации

$$u_i|_{S_\sigma} = f_i(x,\omega), \quad \omega \in [\omega_1, \omega_2] \tag{4}$$

Такая постановка соответствует измерению поля перемещений на части границы S_σ, на которой осуществляется нагружение, в некотором диапазоне частот. Отметим, что в такой общей постановке задача является нелинейной и построение решения осуществляется на основе построения итерационного процесса, в основе которого лежит линеаризация на основе операторного метода Ньютона.

Постановка 2.На практике более реалистичной является другая постановка задачи. Пусть $S_\sigma = S_p \cup S_0$, где на части границы S_0 внешняя нагрузка p_j обращается в нуль, а на S_p отлична от нуля. Тогда эксперимент по зондированию заключается в том, что при некотором нагружении дополнительная информация измеряется на свободной от нагрузок части границы $S_f \subset S_0$:

$$u_i|_{S_f} = f_i(x,\omega), \quad \omega \in [\omega_1, \omega_2] \tag{5}$$

Для решения обратных задач в различных постановках по восстановлению трех переменных характеристик λ, μ, ρ используется несколько подходов. Приведем соответствующие операторные уравнения. Для нахождения трех характеристик будем использовать три режима зондирования, которые характеризуются как разными областями приложения нагрузки, так и способом ее приложения; обозначим эти нагрузки через $p_i^{(m)}, m = 1,2,3$; соответствующие поля смещений будем обозначать $u_i^{(m)}$.

Отметим, что для упругих тел можно пользоваться обобщенным соотношением взаимности и полученным на основе него операторным соотношением. При исследовании коэффициентных обратных задач, состоящих в определении некоторых функций, характеризующих неоднородность, для общих линейных моделей механики сплошной среды

также можно опираться на слабую формулировку, которая весьма часто используется и для исследования прямых задач.

Решение задач. Изложим основные этапы решения сформулированных обратных задач. Перейдем к слабой постановке, для чего спроектируем уравнение движения (1) на элемент v, представляющий собой вектор-функцию с непрерывно дифференцируемыми компонентами и удовлетворяющий граничным условиям на S_u. Используя теорему Гаусса-Остроградского и учитывая граничные условия вида (3), приведем полученное равенство к виду $A(a,u,v)=b(v)$, где $A(a,u,v)$ есть трилинейная форма (линейная по каждому векторному аргументу) переменных a,u,v, правая часть $b(v)$ является линейной формой и зависит от нагрузки. В общем случае возможно сформулировать слабую постановку как для изотропной, так и для анизотропной теории упругости [1] .

В изотропном случае для определяющих соотношений вида [2], исходя из слабой постановки и полагая $v_i = u_i^{(m)}$, имеем следующую систему нелинейных интегральных уравнений типа Урысона с компактными операторами [11]

$$\int_V \left[\lambda (u_{k,k}^{(m)})^2 + \mu (u_{i,j}^{(m)} + u_{j,i}^{(m)})(u_{i,j}^{(m)} + u_{j,i}^{(m)}) - \rho\omega^2 u_i^{(m)} u_i^{(m)} \right] dV = \int_{S_\sigma} p_i^{(m)} f_i^{(m)} dS, \qquad (6)$$

Особенностью этой системы трех операторных уравнений является знакоопределенность ядер при неизвестных функциях λ, μ, ρ. Возможное нарушение этого свойства в зависимости от компонент тензора деформаций имеется в случае несжимаемого материала, когда ядро при λ тождественно обращается в ноль; такая же ситуация возникает в задаче кручения.

Система нелинейных операторных уравнений исследуется на основе операторного метода Ньютона, при этом используется нахождение производных по Фреше от основного оператора. С использованием процедуры линеаризации ранее удалось построить линейную систему интегральных уравнений Фредгольма 1-го рода с гладкими ядрами, позволяющую находить поправки к некоторому начальному приближению на основе двух подходов 1.метода регуляризации А. Н. Тихонова; 2. метода сужения пространства поиска до конечномерного при аппроксимации искомых функций линейными комбинациями выбранных (линейных, квадратичных экспоненциальных).

Отметим, что в последнее время весьма продуктивной является схема исследования обратных коэффициентных задач для вытянутых призматических структур, которые формулируются на основе сочетания вариационного принципа Гамильтона-Остроградского и метода Канторовича, позволяющего учесть и погранслойные решения при постановке обратных задач.

На базе представленных подходов в различных постановках решен ряд задач для балок, пластин, цилиндров. Представлены результаты вычислительных экспериментов для различных вариантов аппроксимации искомых функций, характеризующих законы изменения модулей упругости.

Работа выполнена за счет гранта РНФ №22-11-00265-Р, https://rscf.ru/project/22-11-00265/ в Южном федеральном университете

Список литературы

1. Ватульян А.О. Коэффициентные обратные задачи механики. — М.: Физматлит, 2019. — 272 с.
2. Кабанихин С.И. Обратные и некорректные задачи. — Новосибирск: ФГУП "Издательство СО РАН", 2018. — 512 с.
3. Neto F.D.M., Neto A.J.S. An Introduction to Inverse Problems with Applications. — Berlin: Springer, 2013. — 255 p.
4. Тихонов А.Н., Гончарский А.В., Степанов В.В., Ягола А.Г. Численные методы решения некорректных задач. — М.: Наука, 1990. — 230 с.
5. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Численные методы решения обратных задач математической физики. — М.: Едиториал УРСС, 2004. — 480 с.
6. Ватульян А.О., Юров В.О. Об определении механических характеристик стержневых элементов из функционально-градиентных материалов // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. — 2021. — № 4. — С. 52–63.
7. *Movassagh A.A., Mahmoodi M.J.* A micro-scale modeling of Kirchhoff plate based on modified strain-gradient elasticity theory // European Journal of Mechanics - A/Solids. 2013. Vol. 40, P. 50-59, DOI: 10.1016/j.euromechsol.2012.12.008
8. V.V. Dudarev, A.O. Vatulyan, R.M. Mnukhin, R.D. Nedin Concerning an approach to identifying the Lamé parameters of an elastic functionally graded cylinder// Mathematical Methods in the Applied Sciences. — 2020. — Vol. 43, Iss. 11. — P. 6861–6870.
9. Vatulyan A.O., Dudarev V.V., Mnukhin R.M. Identification of characteristics of a functionally graded isotropic cylinder // International Journal of Mechanics and Materials in Design. — 2021. — Vol. 17, Iss. 2. — P. 321–332.
10. Vatulyan A.O., Yurov V.O. On the Estimation of the Sensitivity of the Coefficients of Models for Inhomogeneous Solids // Mechanics of Solids, 2023, Vol. 58, No. 3, pp. 793–801. DOI: 10.3103/S0025654422601768
11. Хатсон В., Пим Дж. Приложения функционального анализа и теории операторов. — М.: Мир, 1983. — 432 с.

УДК: 539.3 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39638

Акустический мониторинг неоднородных волноводов

В.О. Юров

Южный федеральный университет. Ростов-на-Дону, 344006, Россия.

E-mail: vyurov@sfedu.ru

Аннотация: Рассмотрены задачи о распространении волн в неоднородном цилиндрическом волноводе и идентификации закона изменения его упругих свойств. Исследована постановка задачи о свободных колебаниях ортотропного волновода с произвольным законом поперечной неоднородности и произвольной формой поперечного сечения. Описаны общие свойства дисперсионного множества. Изучена возможность численного и асимптотического построения дисперсионных ветвей. На примере показан алгоритм построения решения задачи в случае вынужденных колебаний. Также на примере задачи об осесимметричных колебаниях волновода с кольцевым поперечным сечением показаны основные этапы постановки и решения обратной задачи о реконструкции переменного вдоль радиальной координаты модуля упругости.

Ключевые слова: неоднородность, волноводы, затухание, вынужденные колебания, обратные задачи.

Acoustic Monitoring of Inhomogeneous Waveguides

V.O. Yurov

Southern Federal University. Rostov-on-Don, 344006, Russia.

E-mail: vyurov@sfedu.ru

Abstract: Problems of wave propagation in an inhomogeneous cylindrical waveguide and identification of the law of change in its elastic properties are considered. The formulation of the problem of free oscillations of an orthotropic waveguide with an arbitrary law of transverse inhomogeneity and an arbitrary cross-sectional shape is investigated. General properties of the dispersion set are described. The possibility of numerically and asymptotically constructing dispersion curves is studied. An example is used to demonstrate an algorithm for constructing a solution to the problem in the case of forced oscillations. Also, using the example of the problem of axisymmetric oscillations of a waveguide with an

annular cross-section, the main stages of the formulation and solution of the inverse problem of reconstructing the elastic modulus variable along the radial coordinate are demonstrated.

Keywords: inhomogeneity, waveguides, attenuation, forced oscillations, inverse problems

PACS: 43.20.Bi, 46.40.Ff

Введение

В последнее время широкое распространение получают конструкции из композитных и функционально-градиентных материалов. К числу таких объектов относятся протяжённые элементы: трубопроводы, скважины и трубы бурильных установок, железнодорожные пути, силовые кабели, а также другие элементы строительных конструкций. Для анализа волновых процессов в подобных упругих и вязкоупругих телах широко используется математическая модель неоднородного цилиндрического волновода [1-4].

1 Постановка прямой задачи об установившихся колебаниях

Рассмотрим цилиндрический волновод с произвольным поперечным сечением, занимающий область $V = S \times \left[-\infty < x_3 < \infty\right]$, где $S = S\left(x_1, x_2\right)$ – поперечное сечение с липшицевой границей $\Gamma = \partial S$. Будем считать, что волновод совершает установившиеся колебания с частотой ω по закону $\exp\left(-i\omega t\right)$. Полная математическая постановка будет содержать уравнения установившихся колебаний, определяющие соотношения для неоднородного ортотропного материала и граничные условия, соответствующие частично свободной Γ_2 и частично закрепленной Γ_1 боковой границе [4]. Решение возникающей однородной краевой задачи будем разыскивать в виде бегущей волны ($u_j = u_j \exp\left(ikx_3\right)$, $j = 1,2,3$ – амплитуды смещений) характеризующейся волновым числом k.

Возникающую систему уравнений относительно безразмерных амплитуд компонент вектора смещений удается записать в операторном виде. В качестве вектора неизвестных будем использовать безразмерный вектор $\mathbf{X} = \left(X_1, X_2, X_3\right)^T$, где $X_1 = u_1 d^{-1}$, $X_2 = u_2 d^{-1}$, $X_3 = -iu_3 d^{-1}$, d – характерный размер поперечного сечения волновода; $g_1 = \lambda\mu_0^{-1}$, $g_2 = \mu\mu_0^{-1}$, $g_3 = \rho\rho_0^{-1}$ – безразмерные функции, описывающие неоднородность изотропного волновода; $\gamma = kd$, $\kappa^2 = \rho_0\omega^2 d^2 \mu_0^{-1}$ – безразмерные спектральные параметры.

В результате анализ задачи сводится к изучению свойств следующего операторного пучка с двумя спектральными параметрами

$$\left(\mathbf{A}_0+\gamma\mathbf{A}_1+\gamma^2\mathbf{A}_2+\kappa^2 g_3\mathbf{I}\right)\mathbf{X}=0, \tag{1}$$

$$\mathbf{X}\big|_{\Gamma_1}=0,\ \left(\mathbf{B}_0+\gamma\mathbf{B}_1\right)\mathbf{X}\big|_{\Gamma_2}=0, \tag{2}$$

где часть боковой границы Γ_1 защемлена, а часть Γ_2 свободна от напряжений. Для ортотропного неоднородного в поперечном сечении волновода введенные выше операторы имеют вид

$$\mathbf{A}_0=\begin{pmatrix}\partial_1 c_{11}\partial_1+\partial_2 c_{66}\partial_2 & \partial_1 c_{12}\partial_2+\partial_2 c_{66}\partial_1 & 0\\ \partial_1 c_{66}\partial_2+\partial_2 c_{12}\partial_1 & \partial_2 c_{22}\partial_2+\partial_1 c_{66}\partial_1 & 0\\ 0 & 0 & \partial_1 c_{55}\partial_1+\partial_2 c_{44}\partial_2\end{pmatrix},\qquad \mathbf{I}=\begin{pmatrix}1&0&0\\0&1&0\\0&0&1\end{pmatrix},$$

$$\mathbf{A}_1=\begin{pmatrix}0 & 0 & -\partial_1 c_{13}-c_{55}\partial_1\\ 0 & 0 & -\partial_2 c_{23}-c_{44}\partial_2\\ c_{13}\partial_1+\partial_1 c_{55} & c_{23}\partial_2+\partial_2 c_{44} & 0\end{pmatrix},\qquad \mathbf{A}_2=\begin{pmatrix}-c_{55}&0&0\\0&-c_{44}&0\\0&0&-c_{33}\end{pmatrix},$$

$$\mathbf{B}_0=\begin{pmatrix}c_{11}n_1\partial_1+c_{66}n_2\partial_2 & c_{12}n_1\partial_2+c_{66}n_2\partial_1 & 0\\ c_{66}n_1\partial_2+c_{12}n_2\partial_1 & c_{66}n_1\partial_1+c_{22}n_2\partial_2 & 0\\ 0 & 0 & c_{55}n_1\partial_1+c_{44}n_2\partial_2\end{pmatrix},\quad \mathbf{B}_1=\begin{pmatrix}0&0&-c_{13}n_1\\0&0&-c_{23}n_2\\c_{55}n_1&c_{44}n_2&0\end{pmatrix}.$$

2 Свойства дисперсионного множества

Будем называть точкой дисперсионного множества такую пару спектральных параметров (κ,γ), при которых задача (1), (2) имеет нетривиальное решение. В случае произвольной формы поперечного сечения и закона неоднородности будем говорить о неявном соотношении $D(\kappa,\gamma)=0$, определяющем дисперсионное множество, где $\kappa\in\mathbb{C}$, $\gamma\in\mathbb{C}$. Только для небольшого количества однородных волноводов канонических форм эти соотношения могут быть записаны в явном виде.

Задача при $\kappa=\gamma=0$ имеет четыре нетривиальных решения, отвечающие движению волновода как абсолютно твердого тела и порождающие собственные формы: смещения вдоль трех осей $\mathbf{X}=(1,0,0)^T$, $\mathbf{X}=(0,1,0)^T$, $\mathbf{X}=(0,0,1)^T$ и поворот вокруг оси волновода $\mathbf{X}=(-x_2,x_1,0)^T$. Дисперсионное множество при $\gamma=0$ представляет собой счётное множество точек вида $(\kappa_j,0)$, которые соответствуют собственным частотам краевой задачи на поперечном сечении и именуются в литературе точками запирания. Эти точки образуют два семейства. Из-за блочной структуры оператора $\mathbf{A}_0+\gamma\mathbf{A}_1+\gamma^2\mathbf{A}_2+\kappa^2 g_3\mathbf{I}$ при $\gamma=0$ задача (1),(2) может быть разделена на задачу относительно неизвестных X_1, X_2 и относительно X_3. Точки дисперсионного множества в совокупности образуют дисперсионные ветви, которые в силу аналитичности при помощи продолжения по параметру могут быть продлены на бесконечность [5] из точек запирания. Дисперсионные

кривые располагаются симметрично относительно осей. Так, если $D(\kappa_1,\gamma_1)=0$, то $D(-\kappa_1,\gamma_1)=0$, $D(\kappa_1,-\gamma_1)=0$.

Для численного решения задачи и построения дисперсионных кривых использован пакет FreeFem++, который требует записи слабой постановки задачи [4]. Путем аналитических построений в окрестности точек запирания удалось доказать, что дисперсионные ветви пересекают частотную ось под прямым углом ($\kappa^2=\tau_0+\tau_2\gamma^2+\ldots$), оператор $\mathbf{A}_0$ является положительным в случае наличия защемленной части границы.

3 Постановка задачи о вынужденных колебаниях

Если на боковой границе волновода действует некоторая периодическая во времени нагрузка, то вместо поиска решений в виде бегущей волны к задаче применяется интегральное преобразование Фурье по осевой координате. Возникающая в пространстве преобразований задача также подвергается обезразмериванию и может быть записана в виде векторного дифференциального уравнения с двумя спектральными параметрами [1]. В качестве примера рассмотрим задачу для волновода с кольцевым поперечным сечением ($a\le r\le b$) и радиальной неоднородностью, где при действии сосредоточенной на кольце периодической нагрузки допустимо осуществлять поиск осесимметричных решений. Такая задача в пространстве трансформант Фурье является одномерной и описывается следующим векторным обыкновенным дифференциальным уравнением:

$$\tilde{\mathbf{X}}'(x)=\mathbf{A}(\kappa,\alpha,x)\tilde{\mathbf{X}}(x),\ \text{где}\ \tilde{\mathbf{X}}(x)=\left(\tilde{X}_1(x),\tilde{X}_2(x),\tilde{X}_3(x),\tilde{X}_4(x)\right)^T \tag{3}$$

$$\tilde{X}_3(\xi_0)=\tilde{X}_4(\xi_0)=0,\ \tilde{X}_3(1)=1,\ \tilde{X}_4(1)=0,\ \xi_0=ab^{-1} \tag{4}$$

Здесь $x=rb^{-1}$, $\xi_0=ab^{-1}$ безразмерная радиальная координата и внутренний радиус, трансформанты $\tilde{X}_1,\tilde{X}_2$ соответствуют перемещениям u_r,u_z, трансформанты $\tilde{X}_3,\tilde{X}_4$ соответствуют σ_r,σ_{rz}, α – параметр преобразования.

Ненулевые компоненты $\mathbf{A}(\kappa,\alpha,x)$ в случае изотропного материала представлены ниже

$$a_{11}=\frac{-g_1}{xG},\ a_{12}=\alpha\frac{g_1}{G},\ a_{13}=\frac{1}{G},\ a_{21}=-\alpha,\ a_{24}=\frac{1}{g_2},\ a_{31}=\frac{G}{x^2}-\frac{g_1^2}{x^2G}-\kappa^2 g_3(x),\ a_{32}=-\alpha\frac{2g_1g_2}{xG},$$

$$a_{33}=-\frac{2g_2}{xG},\ a_{34}=\alpha,\ a_{41}=-\alpha\frac{2g_1g_2}{xG},\ a_{42}=\alpha^2\left(G-\frac{g_1^2}{G}\right)-\kappa^2 g_3(x),\ a_{43}=-\alpha\frac{g_1}{G},\ a_{44}=-\frac{1}{x},\ \text{где}$$

$G=g_1+2g_2$, $g_1=g_1(x)$, $g_2=g_2(x)$.

За исключением полюсов $\tilde{\mathbf{X}}(\kappa,\alpha)$ решение задачи (3),(4) может быть построено при помощи метода пристрелки. Полюса (κ,α) определяются дисперсионным множеством задачи. Для

построения решения в оригиналах выполняется обратное интегральное преобразование [1] по формуле

$$X_j(x,y)=\frac{1}{2\pi}\int_{\sigma}\tilde{X}_j(x,\alpha)\exp(-i\alpha y)d\alpha,\quad j=1,2,3,4,\ z=yb^{-1} \tag{5}$$

При любом значении частотного параметра κ подынтегральная функция имеет конечное число вещественных полюсов, поэтому контур σ выбирается в соответствии с принципом предельного поглощения [5] отличным от $(-\infty,\infty)$ в окрестности полюсов.

4 Постановка обратной задачи

Общая постановка обратной задачи по реконструкции неоднородных свойств заключается в нахождении законов неоднородности по частотно-позиционной информации о поле смещений на части внешней границы волновода. Для изотропного тела это три функции g_1, g_2, g_3. Их восстановление требует проведения нескольких экспериментов с различными зондирующими нагрузками. Реконструкция осуществляется при помощи итерационной схемы [6], где на каждом шаге выполняется линеаризация задачи в окрестности некоторого приближения, а поправки находятся из системы интегральных уравнений Фредгольма (ИУФ) с гладкими ядрами.

В качестве примера рассмотрим задачу о реконструкции переменного модуля сдвига $g_2(x)$. Пусть колебания волновода вызваны сосредоточенной на кольце нагрузкой и в качестве входной информации задана амплитуда радиальных перемещений в некоторой точке y_0.

$$f(\kappa_j)=X_1(1,y_0,\kappa_j),\ \ j=1..N \tag{6}$$

Для нахождения начального приближения и контроля сходимости итерационного процесса введем в рассмотрение невязку, отвечающую тестовой функции $g_{20}(x)$

$$J(f_0)=\sum_{j=1}^{N}\left(f_0(\kappa_j)-f(\kappa_j)\right)^2 \tag{7}$$

Осуществляя минимизацию (7) в классе линейных функций, находим начальное приближение $g_{20}(x)=c_1x+c_2$. Осуществим линеаризацию задачи: $g_2(x)=g_{20}(x)+\varepsilon g_{21}(x)$, $\mathbf{X}(\varepsilon)=\mathbf{X}_0+\varepsilon\mathbf{X}_1+\ldots$, где ε - мало. Для отыскания поправки $g_{21}(x)$ построено интегральное уравнение в пространстве трансформант. Так как информация о поле смещений известна лишь на части границы и трансформанта поля смещений неизвестна, необходимо осуществить обратное преобразование Фурье.

$$\int_{\xi_0}^{1}K(x,\alpha,\kappa)\,x\,g_{21}(x)dx=F(y,\kappa) \tag{8}$$

где $\tilde{K}_1(x,\alpha,\kappa) = -\frac{\left(8g_{20}^2+8g_{10}g_{20}+4g_{10}^2\right)X_{10}^2}{x^2\left(g_{10}+2g_{20}\right)^2} + \frac{4g_{10}\tilde{X}_{10}\tilde{X}_{30}}{x\left(g_{10}+2g_{20}\right)^2} - \frac{\left(8g_{20}^2+8g_{10}g_{20}+4g_{10}^2\right)\alpha^2 X_{20}^2}{\left(g_{10}+2g_{20}\right)^2} -$

$-\frac{4g_{10}^2\alpha\tilde{X}_{10}\tilde{X}_{20}}{x\left(g_{10}+2g_{20}\right)^2} - \frac{2\tilde{X}_{30}^2}{\left(g_{10}+2g_{20}\right)^2} - \frac{\tilde{X}_{40}^2}{g_{20}^2} + \frac{4g_{10}\alpha\tilde{X}_{20}\tilde{X}_{30}}{\left(g_{10}+2g_{20}\right)^2}$, $\tilde{F}(\alpha,\kappa) = -\tilde{X}_{11}(1,\alpha,\kappa)$.

Решая интегральное уравнение при помощи метода регуляризации А.Н. Тихонова [7], находим поправку. Затем строится новое начальное приближение и процесс линеаризации повторяется. Процесс продолжается, пока невязка (6) не достигнет заданных значений или число итераций не станет слишком велико. Проведен ряд вычислительных экспериментов для разных законов неоднородности.

Заключение

Представлена постановка прямой и обратной задач о колебаниях неоднородного ортотропного цилиндрического волновода. Обсуждены способы их решения и восстановления законов неоднородности.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-11-00265-П, https://rscf.ru/project/22-11-00265/ в Южном федеральном университете.

Список литературы

1. *Ватульян А.О., Юров В.О.* Анализ вынужденных колебаний в функционально-градиентном цилиндрическом волноводе // Акуст. журн. 2018. **64**, № 6. С. 649–656.
2. *Eremin A., Glushkov E.V., Glushkova N.V., Lammering R.* Evaluation of effective elastic properties of layered composite fiber-reinforced plastic plates by piezoelectrically induced guided waves and laser Doppler vibrometry // Composite Structures. 2015. **125**. P. 449–458.
3. *Глушков Е.В., Глушкова Н.В., Евдокимов А.А.* Гибридная численно-аналитическая схема для расчета дифракции упругих волн в локально неоднородных волноводах // Акуст. журн. 2018. **64**, № 1. С. 3–12.
4. *Ватульян А.О., Юров В.О.* Об анализе дисперсионного множества для неоднородного ортотропного упругого волновода // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2024. **224-1**, № 4-1. С. 13-23.
5. *Ворович И. И., Бабешко В. А.* Динамические смешанные задачи теории упругости для неклассических областей. Наука. М., 1979.
6. *Ватульян А.О.* Коэффициентные обратные задачи механики. Физматлит. М., 2019.
7. *Тихонов А.Н. Гончарский А.В., Степанов В.В., Ягола А.Г.* Численные методы решения некорректных задач. Наука. М., 1990.

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39639

Исследование обратной задачи микросейсмического зондирования с помощью аналитического подхода

Жарков Д.А.[1)], Жостков Р.А.[1)]

[1)] Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва

Тел.: +7(920)633-50-53; E-mail: denis.Zharkov2014@yandex.ru

На основе аналитического решения прямой задачи микросейсмического зондирования продемонстрирована возможность решения обратной задачи этого подхода методом Монте-Карло по схеме Метрополиса–Гастингса с послойным восстановлением параметров, т.е. при условии локализации поверхностной акустической волны (ПАВ) в пределах зондируемых слоев. Исследовано влияние трех типов априорной информации (значение параметра в точке верхнего слоя, частотная зависимость времени пробега вдоль профиля, дисперсионные кривые в каждой зоне) на устойчивость и точность решения. Ошибка восстановления параметров модели не превышает 3%. Установлено, что увеличение объема априорных данных повышает устойчивость решения в стохастической постановке. Продемонстрировано, что совместное использование амплитудных и скоростных данных не только повышает точность решения, но и позволяет обеспечить его единственность в ситуации, когда информации лишь об одной характеристики ПАВ недостаточно.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИФЗ РАН.

Ключевые слова: микросейсмическое зондирование, ММЗ, неоднородная среда, поверхностная акустическая волна, обратная задача

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39640

Обратная задача в оптоакустике оптического разрешения: расчет передаточного коэффициента давления для цилиндрического источника и сферического приемника

Чекмарева Д.А.[1)], Курников А.А.[1)], Клиньшов В.В.[1)], Турчин И.В.[1)], Субочев П.В.[1)]

[1)] Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук, Нижний Новгород;

Тел.: +7(904)920-8301; E-mail: d.voitovich@ipfran.ru

Оптоакустика оптического разрешения (OR-PAM) сочетает в себе сфокусированное оптическое термоупругое возбуждение и ультразвуковое детектирование, обеспечивая микрометровое разрешение при высококонтрастной ангиографии. Для соблюдения предельно допустимых уровней лазерной экспозиции требуется решать обратную акустическую задачу: по измеренному давлению Pd восстанавливать максимум начального оптоакустического давления P0 в поглотителе и, следовательно, оценивать локальную оптическую освещенность. Вводится коэффициент амплитудных потерь передачи акустического тракта k = P0/Pd, который аккумулирует геометрическое расхождение, частно-зависимое поглощение и дисперсию, а также эффекты пространственного усреднения по конечной апертуре и полосе пропускания приемника. В работе аналитически вычислен k для модели цилиндрического оптоакустического источника и сферически фокусированного приемника с конечной апертурой на основе интеграла Пуассона для волнового уравнения. Обоснован выбор модели источника и сформулированы условия применимости аналитического расчета. Корректность полученных выражений и границы применимости обсуждаются по результатам численного моделирования в пакете k-Wave (MATLAB) с учетом полосовой фильтрации, соответствующей измерительному тракту.

Ключевые слова: оптоакустика оптического разрешения, обратная задача, коэффициент передачи, цилиндрический источник, сферически сфокусированный приемник

INVERSE PROBLEM IN OPTICAL-RESOLUTION OPTOACOUSTICS: CALCULATION OF THE PRESSURE TRANSFER COEFFICIENT FOR A CYLINDRICAL SOURCE AND A SPHERICAL RECEIVER.

Chekmareva D.A.[1)], Kurnikov A.A.[1)], Klinshov V.V.[1)], Turchin I.V.[1)], Subochev P.V.[1)]

1) Federal Research Center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod;

Phone: +7 (904)920-8301; E-mail: d.voitovich@ipfran.ru

Optical-resolution optoacoustics (OR-PAM) combines focused optical thermoelastic excitation with ultrasonic detection, providing micrometer-scale resolution for high-contrast angiography. To comply with maximum permissible laser exposure levels, it is necessary to solve an inverse acoustic problem: to recover the maximum initial optoacoustic pressure P0 in the absorber from the measured pressure Pd and, consequently, to estimate the local optical fluence. The acoustic-path amplitude transfer-loss coefficient k = P0/Pd is introduced; it accumulates geometric spreading, frequency-dependent attenuation and dispersion, as well as the effects of spatial averaging associated with the finite aperture and bandwidth of the receiver. In this work, k is calculated analytically for a model of a cylindrical optoacoustic source and a spherically focused receiver with finite aperture on the basis of the Poisson integral for the wave equation. The choice of the source model is justified, and the conditions of applicability of the analytical calculation are formulated. The validity of the obtained expressions and the limits of applicability are discussed based on numerical simulations in the k-Wave package (MATLAB), taking into account bandpass filtering corresponding to the measurement chain.

Keywords: optical-resolution optoacoustics, inverse problem, transfer coefficient, cylindrical source, spherically focused receiver

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39641

О методе решения интегральных уравнений при первичной обработке данных в задаче ультразвуковой томографии

Новиков Н.С.[1)], Кабанихин С.И.[1)], Шишленин М.А.[1)]

[1)] ИВМиМГ СО РАН, Новосибирск;

E-mail: novikov-1989@yandex.ru

В докладе рассматривается коэффициентная обратная задача, в которой требуется определить параметры среды, в частности, плотность, по данным, полученным после прохождения зондирующего импульса через среду. Такие задачи могут возникать при обработке данных ультразвуковой томографии.

Для решения данной задачи используется многомерный аналог метода Гельфанда --- Левитана --- Крейна, позволяющий свести нелинейную обратную задачу к системе линейных уравнений. Важной особенностью метода является возможность вычисления неизвестного коэффициента без многократного решения прямой задачи, что позволяет быстро производить первичную обработку данных, результаты которой могут быть использованы другими алгоритмами.

В докладе приводятся результаты численного решения обратной задачи, а также обсуждается вопрос использования подходов, основанных на глубоком обучении для решения обратной задачи в рамках рассматриваемого подхода.

Работа поддержана грантом РНФ 25-61-00027 "Волновая томография: суперкомпьютерное моделирование, машинное обучение и эксперимент".

Ключевые слова: обратные задачи, некорректные задачи, интегральные уравнения

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39642

Уровни частичной прозрачности и точечные рассеиватели

Гриневич П.Г.[1)], Новиков Р.Г.[2)]

[1)] Математический институт им. В. А. Стеклова РАН, Москва.

[2)]CMAP, CNRS, École Polytechnique, Institut Polytechnique de Paris, Palaiseau, France;

Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, Москва.

Тел.: +7 (903)543-35-37; E-mail: grinev@mi-ras.ru

Уровень энергии E в квантовой или волновой задаче рассеяния (в частности, к этому классу относится и акустическая волновая задача рассеяния**)** называется уровнем частичной прозрачности если можно подобрать падающую волну так, чтобы не было рассеянной. Размерность ядра оператора рассеяния называется кратностью уровня частичной прозрачности.

Типичный результат в этой области утверждает, что для регулярных рассеивателей с компактным носителем 1) кратности всех уровней частичной прозрачности конечны и 2) эти уровни образуют дискретное множество. Мы разъясняем, что эти результаты имеют ограниченную применимость, поскольку

1) В 1995 году мы показали, что в размерности 2 можно построить регулярные потенциалы, убывающие быстрее любой степени расстояния он начала координат, полностью прозрачные при одной энергии.

2) Для многоточечных рассеивателей все уровни энергии -- уровни частичной прозрачности бесконечной кратности.

Также для спектральной задачи с линейными однородными граничными условиями, включая случаи Дирихле, Неймана и Робина, показано, что если уровень энергии E в квантовой задаче (или, соответственно, квадрат волнового числа в акустической задаче) является собственным значением кратности m, то добавление к нему n дополнительных точечных рассеивателей изменяет кратность не более чем на n.

Ключевые слова: точечные рассеиватели, частоты частичной прозрачности

Transmission eigenvalues and Exact Scatterers

Grinevich P.G.[1)], Novikov R.G.[2)]

[1)] Steklov Mathematical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow

[2)]CMAP, CNRS, École Polytechnique, Institut Polytechnique de Paris, Palaiseau, France;

Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics of the RAS, Moscow

Phone.: +7 (903)543-35-37; Email: grinev@mi-ras.ru

An energy level E in a quantum or wave scattering problem (in particular, the acoustic wave scattering problem also belongs to this class) is called a transmission eigenvalue if the incident wave can be chosen in such a way that it is not scattered. The dimension of the scattering operator kernel is called the multiplicity of the transmission eigenvalue.

A typical result in this area states that for regular scatterers with compact support, 1) all partial transparency levels have finite multiplicity, and 2) these levels are of a disrete set. We clarify that these results have limited applicability, since

1) In 1995, we showed that in dimensions 2, one can move regular potentials decaying faster than any power of the distance in the coordinates, completely transparent starting from a single energy.

2) For multipoint scatterers, all energy levels are transmission eigenvalues of infinite multiplicity. Also, for spectral problems with linear homogeneous boundary conditions, including the Dirichlet, Neumann, and Robin conditions, it has been shown that if the energy level E in a quantum problem (or, correspondingly, the squared wavenumber in an acoustic problem) is an eigenvalue of multiplicity m, then adding n additional scatterers to it changes a multiplicity of at most at n.

Keywords: point scatterers, trasmission eigenvalues frequences

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39643

Ультразвуковая томография: обратные задачи и машинное обучение

Шишленин М.А.[1)], Новиков Н.С.[1)], Кабанихин С.И.[1)]

[1)] Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск

Тел.: +7(383) 3306167; E-mail: m.a.shishlenin@mail.ru

Развитие методов ультразвуковой ранней диагностики злокачественных образований в мягких тканях является одной из ключевых проблем в медицине, а отсутствие воздействия ионизированного излучения стало актуальной тенденцией в медицине, что делает ультразвуковую томографию весьма востребованной.

В докладе будут представлены актуальные теоретические результаты и современные численные методы, применяемые в медицинской ультразвуковой томографии по определению новообразований в мягких тканях человека, включая постановки кинематических и динамических обратных задач и применение методов машинного обучения для обработки данных ультразвуковых медицинских томографов. Представлены результаты численных расчетов и сравнительный анализ численных алгоритмов.

Работа выполнена при поддержке РНФ, проект 25-61-00027 "Волновая томография: суперкомпьютерное моделирование, машинное обучение и эксперимент".

Ключевые слова: акустическая томография, коэффициентные обратные задачи, оптимизация, машинное обучение

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39644

Численное моделирование данных ультразвуковых измерений для задач акустической эластографии

Чернов В.В.[1)], Рычагов М.Н.[2)]

[1)] Исследовательский центр Самсунг, г. Москва;

[2)] Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва;

Тел.: +7(499)720-85-54; E-mail: michael.rychagov@gmail.com

В докладе рассматриваются методы обработки и моделирования ультразвуковых эластографических сигналов, направленные на количественную оценку упругих и вязкоупругих свойств биологических тканей. Основное внимание уделено квазистатическому и вибро-эластографическому подходам, включая анализ их физических предпосылок, вычислительных этапов и сравнительных преимуществ. Представлены алгоритмы оценки смещений тканей на основе радиочастотных ультразвуковых данных и изображений, сформированных в процессе *B*-сканирования, с использованием корреляционных методов, динамического программирования и блочного сопоставления. Рассматривается постановка и численное решение обратной задачи теории упругости для восстановления распределений модуля Юнга и коэффициента Пуассона. Описаны методы спектрального анализа вибро-эластографических данных для качественной визуализации механических характеристик тканей. Показаны результаты численного моделирования, конечно-элементного анализа и экспериментальных исследований на фантомах и in-vivo данных. Отдельное внимание уделено вопросам вычислительной эффективности и реализации алгоритмов на параллельных архитектурах (GPU). Представленный подход позволяет повысить контрастность, пространственное разрешение и достоверность количественных эластограмм, расширяя возможности ультразвуковой диагностики в клинической практике.

Ключевые слова: акустическая эластография, количественная характеристика тканей, упругие свойства биологических органов

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39645

Двухточечные формулы восстановления фазы

Новиков Р.Г.[1) 2)], Сивкин В.Н.[3)]
[1)] ИТПЗ РАН, Москва;
[2)]CNRS France, Paris;
[3)]НИУ ВШЭ, Москва.
Тел.: +7 (977)387-72 86;
E-mail: sivkin96@yandex.ru

Рассмотрена задача восстановления фазы радиационного решения акустического уравнения Гельмгольца во внешней области. Предположим, что на некоторой плоскости известна интенсивность полного поля, то есть суммы плоской волны и радиационного решения. Предложены простые локальные формулы восстановления фазы с использованием амплитуды рассеяния, а также выведены оценки погрешности. Получена численная реализация двухточечных формул.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-71-00116, https://rscf.ru/project/25-71-00116/

Ключевые слова: уравнение Гельмгольца, задача восстановления фазы, голография

Two-point formulas for phase recovering

Novikov R.G., Sivkin V.N.
CNRS, France & IEPT RAS, Russia;
HSE University? Moscow, Russia
Tel.: +7 (977)387-72 86; E-mail: sivkin96@yandex.ru

We consider a plane wave, a radiation solution, and the sum of these solutions (total solution) for the acoustic Helmholtz equation in an exterior region. Suppose that the intensity of the total field, i.e., the sum of a plane wave and the radiation solution, on a certain plane is given. We give two-point local formulas for approximate recovering the radiation solution restricted to a plane from the intensity of the total solution at the plane, that is, from holographic data. A numerical implementation is also presented.

The study was funded by the Russian Science Foundation grant No. 25-71-00116, https://rscf.ru/project/25-71-00116/

Keywords: Helmholtz equation, phase retrieval problem, holography

УДК: 534.2 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39646

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ АКУСТИЧЕСКОГО РАССЕЯНИЯ С УЧЕТОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МОД В ВОЛНОВОДЕ ОКЕАНИЧЕСКОГО ТИПА

Шуруп А.С. [1,2,3,a], Щербина А.В.[1]

[1] *МГУ имени М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, 119991.*

[2] *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, 123242.*

[3] *Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН. Москва, 117997.*

E-mail: [a]shurup@physics.msu.ru

Работа посвящена развитию методов модовой томографии океана, использующих разложение восстанавливаемых параметров среды по базисам специального типа – полосчатым базисам [1]. Ранее такой подход был обобщен для восстановления параметров мелкого моря в адиабатическом приближении [2]. В качестве данных рассеяния при решении обратной задачи используются времена распространений отдельных мод в различных частотных диапазонах. Используется линеаризованный вариант решения с построением матрицы возмущений. В настоящей работе для учета взаимодействия мод (многоканального рассеяния) используется адаптация полосчатого базиса. При этом по-прежнему рассматривается линеаризованное решение, однако, матрица возмущения становится блочной – отдельные блоки описывают обмен энергией между модами разных номеров. Приводятся примеры численного моделирования, демонстрирующие возможности разработанной томографической схемы для восстановления неоднородностей скорости звука в условиях мелкого моря.

Ключевые слова: обратная задача акустического рассеяния, океанический волновод, полосчатый базис, неадиабатическое распространение мод

NUMERICAL SOLUTION OF ACOUSTIC INVERSE SCATTERING PROBLEM WITH MODE INTERACTION IN OCEAN-TYPE WAVEGUIDE

Shurup A.S.[1,2,3,a], Scherbina A.V.[1]

[1] *Department of Acoustics, Faculty of Physics, Moscow State University, 119991, Russia.*

[2] *The Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS. Moscow 123995, Russia.*

[3] *Shirshov Institute of Oceanology, RAS. Moscow, 117997, Russia*

E-mail: [a]shurup@physics.msu.ru

The work is devoted to the problem of ocean acoustic mode tomography. Method of solution is considered based on decomposition of reconstructed parameters into bases of a special type – band bases [1]. Previously, this approach was generalized to reconstruction of shallow sea parameters in the adiabatic approximation. [2]. The scattering data used to solve the inverse problem are the propagation times of individual modes in different frequency ranges. A linearized version of the solution is used with the construction of perturbation matrix. In this work, band basis adaptation is regarded to take into account mode interaction (multichannel scattering). The linearized solution is still considered, but the perturbation matrix becomes block-like – individual blocks describe the energy exchange between modes of different numbers. Examples of numerical modeling are presented to demonstrate the capabilities of developed tomographic scheme for reconstructing sound velocity inhomogeneities in shallow sea conditions.

Keywords: inverse acoustic scattering problem, oceanic waveguide, banded basis, nonadiabatic mode propagation

PACS: 43.30.+m, 43.60.Pt

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39647

Динамические обратные задачи двумерной акустической томографии и нейронные сети

Губер А.В.[1)]

[1)] *Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск*

Тел.: (8 913 026 34 67); E-mail: (alexej.guber@yandex.ru)

В докладе исследуется математическая модель распространения акустических волн в двумерной неоднородной области, основанная на гиперболической системе дифференциальных уравнений первого порядка с частными производными. Рассматривается соответствующая этой модели коэффициентная обратная задача определения по известным значениям давления в заданных точках рассматриваемой области параметров среды: плотности, коэффициента затухания и скорости волны. Исследуется возможность применения к решению этой задачи методов машинного и глубокого обучения: нейронных операторов, физически-обоснованных нейронных сетей, сетей Колмогорова-Арнольда и пр. Приводится сравнение качества и скорости восстановления параметров указанными методами с классическим градиентным методом.

Работа выполнена при поддержке РНФ, проект 25-61-00027 "Волновая томография: суперкомпьютерное моделирование, машинное обучение и эксперимент".

Ключевые слова: динамические коэффициентные обратные задачи, нейронные сети, PINN

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39648

Акустическая томография: прямая и обратная задача для двумерного уравнения эйконала

Дударь М.Р.[1)], Шишленин М.А.[1)]
[1)] Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск;
Тел.: 8 996 9321616; E-mail: maxdudar1101@mail.ru

В докладе рассматриваются методы решения прямой и обратной задач для двумерного уравнения эйконала в контексте медицинской ультразвуковой томографии, ориентированной на раннюю диагностику злокачественных новообразований в мягких тканях человека.

Исследуются подходы к решению прямой задачи: классические разностные схемы, методы быстрого марша и быстрого сметания, а также нейронные сети. Проводится их сравнительный анализ по вычислительной сложности, точности и возможности внедрения в медицинские задачи. Отмечается, что методы быстрого марша/сметания обеспечивают высокую точность, но требуют сложной реализации распараллеленной версии для высокой скорости работы, тогда как нейронные сети дают высокую скорость после обучения, однако зависят от объёма и качества данных, а также имеют низкую адаптируемость под новые данные.

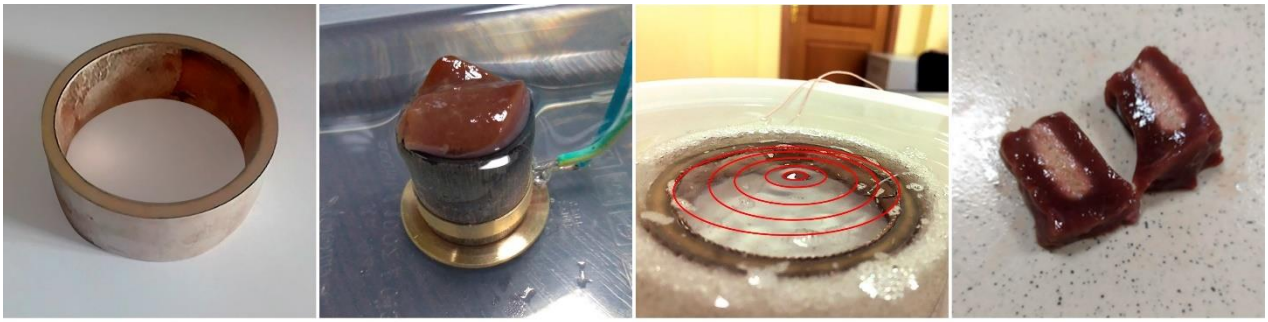
Обратная задача состоит в определении скорости распространения волн по временам прихода в детекторы и сводится к задаче оптимизации целевого функционала градиентными методами, где градиент функционала вычисляется через решение прямой и соответствующей сопряжённой задачи. Обсуждаются численные аспекты вычисления градиента и устойчивости данного подхода. Результаты исследования могут служить основой для разработки новых алгоритмов и программных решений, предназначенных для инженеров и исследователей в области медицинской томографии, а также способствовать повышению точности и доступности диагностических процедур.

Работа выполнена при поддержке РНФ, проект 25-61-00027 "Волновая томография: суперкомпьютерное моделирование, машинное обучение и эксперимент".

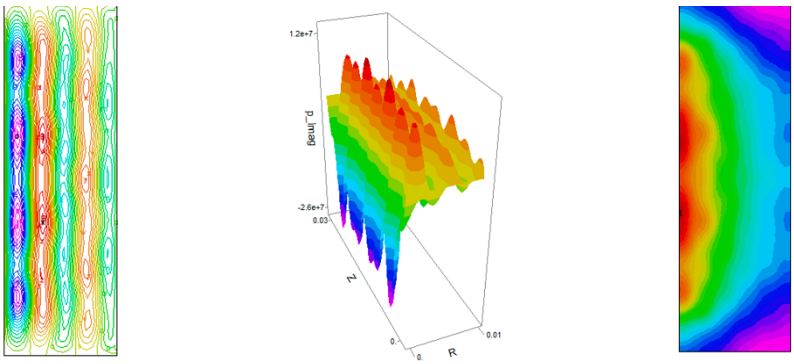
Ключевые слова: уравнение эйконала, ультразвуковая томография, обратная задача, оптимизация, нейронные сети

Назад к содержанию секции

СЕКЦИЯ МЕДИЦИНСКАЯ АКУСТИКА



(*а*) (*б*) (*в*) (*г*)



(*а*) (*б*) (*в*)

назад к Содержанию

СОДЕРЖАНИЕ СЕКЦИИ МЕДИЦИНСКАЯ АКУСТИКА

1. ХАРАКТЕРНЫЕ ТИПЫ ТЕПЛОВЫХ РАЗРУШЕНИЙ БИОТКАНИ В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ФОКУСИРОВКИ МОЩНОГО УЛЬТРАЗВУКА
Карзова М.М., Пестова П.А., Цысарь С.А., Папикян Л.А., Хохлова В.А. 1016

2. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО НАГРЕВА БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ СТОЯЧИМИ ВОЛНАМИ
Швецов И.А., Швецова Н.А., Фоменко Е.И., Оганесян П.А., Соловьев А.Н., РыбянецА.Н. 1018

3. СФОКУСИРОВАННЫЙ УЛЬТРАЗВУК В КОМБИНИРОВАННОЙ ТЕРАПИИ ГЛИОБЛАСТОМЫ ОТКРЫТИЕ БАРЬЕРА ДЛЯ ДОСТАВКИ ЛЕКАРСТВ И СОНОДИНАМИЧЕСКАЯ ТЕРАПИЯ
Абакумова Т.О. 1024

4. РАЗРАБОТКА ПОДХОДОВ К СОНОДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕРАПИИ ГЛИОБЛАСТОМЫ С ПОМОЩЬЮ СФОКУСИРОВАННОГО УЛЬТРАЗВУКА
Далинина В.Д., Медведев Д.Ю., Шашковская В.С., Мамлеев А.Р., Островерхов П.В., Абакумова Т.О. 1026

5. КОМБИНАЦИЯ ЭЛЕКТРОННОГО И МЕХАНИЧЕСКОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ФОКУСА МНОГОЭЛЕМЕНТНОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ РЕШЕТКИ ПРИ ТРАНСКРАНИАЛЬНОМ ОБЛУЧЕНИИ МОЗГА
Чупова Д.Д., Крохмаль А.А., Росницкий П.Б., Солонцов О.В., Синицын В.Е., Мершина Е.А., Сапожников О.А., Хохлова В.А. 1028

6. БИНАРНАЯ СЕГМЕНТАЦИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ АБЕРРАЦИЙ ПРИ HIFU-ТЕРАПИИ
Нартов Ф.А., Росницкий П.Б., Пономарчук Е.М., Хохлова В.А. 1030

7. ВЛИЯНИЕ УПРУГИХ СВОЙСТВ И СТРУКТУРЫ БИОТКАНЕЙ НА ИХ ВОСПРИИМЧИВОСТЬ К МЕХАНИЧЕСКОМУ РАЗРУШЕНИЮ ФОКУСИРОВАННЫМ УЛЬТРАЗВУКОМ
Пономарчук Е.М., Цысарь С.А., Данилова Н.В., Кадрев А.В., Хохлова В.А. 1032

8. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЯЗКОУПРУГИХ СВОЙСТВ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ТКАНИ ВИБРАЦИОННЫМ ИМПЕДАНСНЫМ МЕТОДОМ
Казаков В.В., Немирова С.В., Петушков А.А., Елистратова Д.Н. 1034

9. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОПРЕДЕЛЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТКАНЕИММИТИРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ
Гелашвили А.А., Кузнецов С.И., Лукин Г.С. 1040

10. РАЗРАБОТКА ДОЛГОВЕЧНОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТКАНЕЙ ПЕЧЕНИ ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ЭЛАСТОГРАФИИ
Гребенникова В.В., Леонов Д.В. 1047

11. АКУСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ НЕИНВАЗИВНОГО АНАЛИЗА ОБЪЕМНЫХ ТКАНЕИНЖЕНЕРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ IN VITRO
Храмцова Е.А., Петронюк Ю.С., Антипова К.Г., Шариков Р.В., Богаченков А.Н., Малахов С.Н., Бедник Д.Ю., Дмитряков П.В., Григорьев Т.Е. 1055

12. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЛАКСАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦЕЛЬНОЙ КРОВИ ЧЕЛОВЕКА ДЛЯ РАЗРАБОТКИ НОВЫХ АКУСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ В ЛАБОРАТОРНОЙ МЕДИЦИНСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ
Клемина А.В., Гурбатов С.Н., Клемин В.А. 1061

13. ВЛИЯНИЕ ДЕФОКУСА АКУСТИЧЕСКОЙ ЛИНЗЫ НА ИЗМЕРЕНИЕ ЗАТУХАНИЯ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ МИКРОСКОПИИ
Петронюк Ю.С., Храмцова Е.А. Антипова К.Г., Богаченков А.Н., Григорьев Т.Е., Левин В.М.....1067

14. ВЛИЯНИЕ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЬЕЗОПОЛИМЕРНЫХ ДЕТЕКТОРОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ СКАНИРУЮЩЕЙ ОПТОАКУСТИЧЕСКОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ
Курников А.А., Прудников М.Б., Казаков В.В., Воробьев В.А., Чекмарева Д.А., Глявина А.М., Орлова А.Г., Субочев П.В. 1073

15. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ЛЕГОЧНОЙ ГИПЕРТЕНЗИИ
Рябков М.В., Утешева Е.Е., Грамович В.В., Дмитриев К.В. 1075

16. ИНДЕКС ЗВУКОВОЙ ЭНЕРГИИ ШУМОВ ФОРСИРОВАННОГО ВЫДОХА ЧЕЛОВЕКА: ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ ГРАНИЦЫ НОРМЫ
Костив А.Е., Малаева В.В. 1081

17. СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРНЫХ ТИПОВ ТЕПЛОВОЙ АБЛЯЦИИ РАЗЛИЧНЫХ БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ EX VIVO ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ МОЩНОГО ФОКУСИРОВАННОГО УЛЬТРАЗВУКА
Папикян Л.А., Пестова П.А., Цысарь С.А., Хохлова В.А., Карзова М.М. 1089

18. НОВЫЙ КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД НЕИНВАЗИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПОВЕРХНОСТНЫЕ ТКАНИ ДЛЯ ЭСТЕТИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИИ ТЕЛА
Резниченко А.Н., Петрова Е.И., Константинова М.Г., Макарьев Д.И., Рыбянец А.Н. ...1091

19. ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТЕЙ УПРУГИХ ВОЛН И ЧАСТОТНО-ЗАВИСИМОГО ЗАТУХАНИЯ В ФАНТОМАХ БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ
Сорокин С.Д., Пестова П.А., Цысарь С.А., Сапожников О.А., Кадрев А.В., Хохлова В.А. 1099

20. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ VERASONICS ДЛЯ ЗАДАЧ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДИАГНОСТИКИ (ЭЛАСТОГРАФИЯ SWEI, SWD ПАРАМЕТР, H-SCAN)
Демин И.Ю., Спивак А.Е.....1105

21. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ И СКОРОСТИ В РАСЧЕТАХ ПРОХОЖДЕНИЯ ФОКУСИРОВАННОГО УЛЬТРАЗВУКА ЧЕРЕЗ ЧЕРЕП
Крохмаль А.А., Росницкий П.Б., Цысарь С.А., Хохлова В.А., Сапожников О.А.....1111

УДК: 534.292 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39649

Характерные типы тепловых разрушений биоткани в различных режимах фокусировки мощного ультразвука

Карзова М.М., Пестова П.А., Цысарь С.А., Папикян Л.А., Хохлова В.А.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Ленинские горы, ГСП-1, Москва, 119991, Россия
Тел.: +7 (495) 939-29-52;
E-mail: karzova@physics.msu.ru

В большинстве клинических установок неинвазивной HIFU-хирургии используется тепловой механизм абляции биотканей с помощью фокусированного ультразвука. Создание объемных разрушений в ткани основывается на данных о параметрах единичных воздействий, зависящих от режима фокусировки. В работе представлены результаты лабораторных экспериментов *ex vivo* по созданию тепловых разрушений различного типа с использованием квазилинейного и ударно-волнового непрерывного ультразвукового воздействия, а также в импульсно-периодических ударно-волновых режимах. В качестве источника использовался одноэлементный излучатель с частотой 1.2 МГц, фокусным расстоянием и полной апертурой 120 мм. Диапазон акустической мощности составлял от 50 до 500 Вт, амплитуда ударных фронтов в фокусе – до 80 МПа, время облучения – до 3 с. Сравнивались характерные размеры, форма и внутренняя структура разрушений в образцах говяжьей печени *ex vivo* для различного времени, пиковой и средней мощности и полной энергии воздействия. Показано, что использование импульсно-периодических ударно-волновых режимов облучения позволило в 5 раз ускорить получение теплового разрушения с более резкой границей между аблированной и интактной тканью по сравнению с непрерывным режимом облучения с той же средней мощностью, а также визуализировать процесс формирования разрушения с помощью диагностического ультразвука за счет рассеяния на пузырьках кипения. Определены режимы воздействия, при которых достигаются три характерные формы разрушений: в форме «рисового зерна», «головастика» с тепловым контуром, выпаренной центральной полостью и тепловым «хвостом», а также смешанного типа в форме «головастика» с механически разрушенной передней частью «головы». Работа поддержана грантом РНФ №25-72-10071.

Ключевые слова: высокоинтенсивный фокусированный ультразвук, HIFU, тепловая абляция, ударный фронт.

Characteristic thermal lesions of biotissue under different focusing modes of high-intensity ultrasound

Karzova M.M., Pestova P.A., Tsysar S.A., Papikyan L.A., Khokhlova V.A.

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics,
Leninsky Gory, GSP-1, Moscow, 119991, Russia
Phone: +7 (495) 939-29-52;
Email: karzova@physics.msu.ru

In most clinical setups of non-invasive HIFU surgery, thermal ablation of biotissue is employed using focused ultrasound. The creation of volumetric tissue lesion is based on data regarding the parameters of individual exposures, which depend on the focusing mode. This work presents results from *ex vivo* laboratory experiments on generating different types of thermal lesions using quasi-linear and shock wave continuous ultrasound exposure, as well as in pulsed-periodic shock wave modes. A single-element transducer with a frequency of 1.2 MHz, focusing distance, and full aperture of 120 mm was used as the source. The acoustic power ranged from 50 to 500 W; the amplitude of shock fronts in the focus was up to 80 MPa; and the exposure time was up to 3 seconds. The characteristic sizes, shape, and internal structure of lesions in *ex vivo* beef liver samples were compared for different durations, peak and average powers, and total energy of exposure. It was shown that using pulsed-periodic shock wave modes accelerated the formation of thermal lesion by a factor of 5 with a sharper margin between ablated and intact tissue compared to continuous exposure at the same average power. Additionally, the process of lesion formation was visualized via diagnostic ultrasound by scattering on cavitation bubbles. Exposure modes were identified where three characteristic lesion forms were achieved: a “rice grain” shape, a “tadpole” with a thermal rim, a vaporized central cavity, and a thermal “tail,” as well as a mixed type in the shape of a “tadpole” with the mechanically disrupted front part of the “head.” This work was supported by the RSF grant №25-72-10071.

Keywords: high-intensity focused ultrasound (HIFU), thermal ablation, shock front.

УДК 534.7; 534.292 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39650

Компьютерное моделирование и экспериментальное исследование ультразвукового нагрева биологических тканей цилиндрическими стоячими волнами

И.А. Швецов[1], Н.А. Швецова[1], Е.И. Фоменко[2], П.А. Оганесян[2], А.Н. Соловьев[3], А.Н. Рыбянец[1,*]

[1]Южный федеральный университет, Научно-исследовательский институт физики, 344090, Ростов-на-Дону, Россия

[2]Южный федеральный университет, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича, 344090, Ростов-на-Дону, Россия

[3]Крымский инженерно-педагогический университет имени Февзи Якубова, Республика Крым, 295015, Симферополь, Россия

*E-mail: *arybyanets@gmail.com*

Аннотация: Разработка новых методов и устройств для терапевтического воздействия на большие объемы поверхностных тканей с использованием ультразвуковой энергии более эффективными и безопасными способами является одним из приоритетных направлений современной эстетической и восстановительной медицины. Одной из таких возможностей является использование кольцевых или цилиндрических ультразвуковых преобразователей в сочетании с вакуумной фиксацией обрабатываемой ткани внутри преобразователя. В данной работе проведено математическое и компьютерное моделирование, а также экспериментальная валидация процесса ультразвукового нагрева биологической ткани, помещенной внутрь полого цилиндрического пьезоэлемента. В качестве математической модели пьезоэлемента использовалась линейная теория упругости. Окружающая среда и биологический материал моделировались в рамках акустических сред. В численных расчетах динамики конструкции использован метод конечных элементов, реализованный в пакетах ACELAN и COMSOL. Нестационарная задача о нагреве акустической среды решалась в конечно-элементных пакетах COMSOL и FlexPDE. В натурном эксперименте биологическая ткань (говяжья печень) помещалась внутрь полого цилиндрического пьезоэлемента, поляризованного по радиусу. Осевой разрез ткани позволял определить картину температурного поля и сравнить ее с результатами численного эксперимента. Результаты численного моделирования хорошо согласуются с данными натурного эксперимента.

Ключевые слова: цилиндрический пьезоэлемент, акустическая среда, стоячая волна, ультразвуковой нагрев, метод конечных элементов.

Computer modeling and experimental study of ultrasonic heating of biological tissues using cylindrical standing waves

I.A. Shvetsov[1], N.A. Shvetsova[1], E.I. Fomenko[2], P.A. Oganesyan[2], A.N. Solovyev[3], A.N. Rybyanets[1,*]

[1]Research Institute of Physics, Southern Federal University, Rostov-on-Don, 344090, Russia

[2]Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Sciences the name of I.I. Vorovich, Southern Federal University, Rostov-on-Don, 344090, Russia

[3]Crimean Engineering and Pedagogical University the name of Fevzi Yakubov, Republic of Crimea, Simferopol, 295015, Russia

*E-mail: *arybyanets@gmail.com*

Abstract: The development of new methods and devices for therapeutically treating large volumes of superficial tissue using ultrasound energy in more effective and safe ways is a priority area in modern aesthetic and restorative medicine. One such approach is the use of ring or cylindrical ultrasound transducers in combination with vacuum fixation of the tissue being treated within the transducer. This study includes mathematical and computer modeling, as well as experimental validation of the ultrasonic heating process of biological tissue placed inside a hollow cylindrical radially polarized piezoelectric element. Linear elasticity theory was used as the mathematical model of the piezoelectric element, while the surrounding environment and biological material were modeled within acoustic environments. The finite element method implemented in the ACELAN and FlexPDE packages was used for numerical calculations of the structure's dynamics and acoustic heating. In the field experiment, biological tissue (beef liver) was placed inside the hollow cylindrical piezoelectric element. High-frequency vibrations were excited in a cylindrical piezoelectric element across the thickness of the cylinder wall. The maximum acoustic pressure was located at the cylinder axis, causing this region of the biological tissue to gradually heat up. An axial section of the tissue allowed us to determine the temperature field pattern and compare it with the results of the numerical experiment. The numerical simulation results are in good agreement with the data from the field experiment.

Keywords: cylindrical piezoelectric element, acoustic environment, standing wave, ultrasonic heating, finite element method.

PACS: 87.19.Xx; 87.80.−y; 43.35.Yb

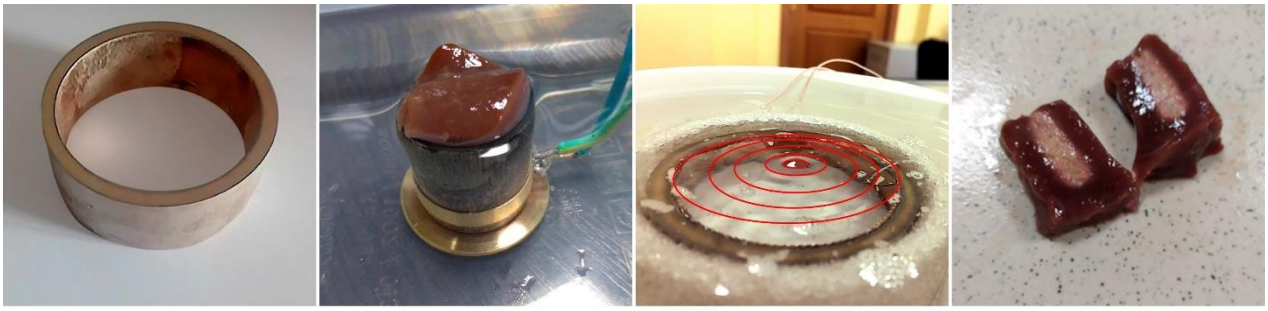
Введение

Воздействие ультразвука на биологические ткани широко применяется в медицине [1]

как при решении прямых, так и обратных задач. В прямых задачах внутри тканей создается заданное поле скоростей, давлений и температур, которые оказывают определенное воздействие на среду. Моделирование прямых задач акустического фокусирования и разогрева дает инструмент контроля за адекватностью работы приборов. Такая проверка может быть осуществлена на модельной задаче, для которой проведен натурный эксперимент и проведен расчет исследуемых полей на основе математической модели. Так в настоящей работе рассматривается разогрев биологической ткани, помещенной внутрь полого цилиндрического пьезоэлемента, поляризованного по радиусу, внешняя и внутренняя цилиндрические поверхности которого электродированы. С помощью гармонической по времени разности потенциалов возбуждаются радиальные (толщинные стенок цилиндра) колебания в мегагерцовом диапазоне. Внутри пьезоэлемента возникают «стоячие волны», волновая картина которых характеризуется периодическим чередованием интенсивности вдоль радиуса и постоянным распределением вдоль оси, кроме торцевых областей. Максимум давления возникает на оси цилиндра, за счет чего эта область через некоторое время разогревается. Сделав осевой разрез ткани, можно определить картину температурного поля и сравнить ее с результатами численного эксперимента.

1 Натурный эксперимент

В эксперименте ex vivo исследовалось воздействие на биологическую ткань цилиндрической стоячей волны, формируемой внутри полого цилиндрического преобразователя (рис. 1).



(*а*) (*б*) (*в*) (*г*)

Рис. 1. Цилиндрический преобразователь (*а*), пьезоэлемент с биоматериалом (*б*), схема цилиндрических стоячих волн внутри цилиндра, заполненного водой (*в*), результат теплового нагрева биоматериала (*г*).

В эксперименте использовались цилиндрические пьезоэлементы с внешним диаметром 21 мм, внутренним диаметром 19 мм и высотой 11.7 и 30 мм (частота антирезонанса 2.41 МГц). В таблицах 1 и 2 приведены протоколы испытаний для короткого и длинного цилиндра соответственно.

Таблица 1

Протокол испытаний № 1

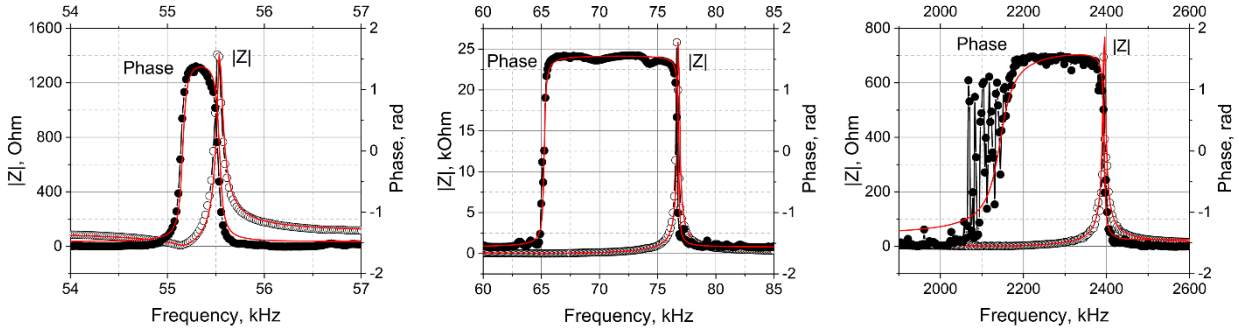
№	Частота, МГц	Напряжение, мВ	Мощность электр., Вт	Время, сек
1	2.41	400	75/15	30 (нет ожога)
2	2.41	500	120/30	30
3	2.41	600	215/50	15
4	2.41	600	260/60	30

Таблица 2

Протокол испытаний № 2

№	Частота, МГц	Напряжение, мВ	Мощность электр., Вт	Время, сек
1	2.41	400–500	115/47–168/70	120
2	2.41	600	200/47	30
3	2.41	650	240-60	15
4	2.41	600	200/55	60

На рисунке 2 представлены импедансные спектры, используемые для определения собственных резонансных частот для использованных пьезоэлементов.



(*а*) (*б*) (*в*)

Рис. 2. Импедансные спектры для различных мод колебаний цилиндрических пьезоэлементов: осевая (*а*), радиальная (*б*), толщинная (*в*).

2 Математическая постановка задачи

Решение задачи состоит из двух этапов. На первом этапе в цилиндрической системе координат r, ϕ, z рассматривается составная область $V = V_1 \cup V_2$, причем $V_1 = \{r \in [0; r_1], \phi \in [0; 2\pi], z \in [0; l]\}$ – акустическая среда, $V_2 = \{r \in [r_1; r_2], \phi \in [0; 2\pi], z \in [0; l]\}$ – электроупругая (пьезокерамика, радиально поляризованная). Пьезоэлемент рассматривается в рамках линейной теории упругости [2], в акустической среде неизвестным является потенциал скоростей [3].

На втором этапе в области V_1 рассматривается нестационарное уравнение теплопроводности относительно неизвестного распределения температуры T:

$$\nabla \cdot \left(\lambda \nabla(T)\right) - c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} + S = 0 \qquad (1),$$

где λ – коэффициент теплопроводности, c_p – удельная теплоемкость, ρ – плотность, S – внутренний источник тепла, пропорциональный модулю давления $p = p_r + ip_{im}$ в акустической среде

$$S = S_0\sqrt{(p_r^2 + p_{im}^2)} \qquad (2).$$

На торцах цилиндра V_1 задан теплообмен с окружающей средой температуры T_0, боковая цилиндрическая поверхность теплоизолирована.

3 Численный эксперимент

На первом этапе проводится модальный и гармонический анализ конструкции в конечно-элементном пакете (КЭ) ACELAN [4]. Проведен численный эксперимент для размеров r_1 = 9.5 мм, r_2 = 10.5 мм, l = 11.7 и 30 мм и материалов PZT-4 и Вода. Определены собственные частоты мод колебаний пьезоэлемента и проведено сравнение с экспериментом, данные для высоты цилиндра 30 мм представлены в таблице 3.

Таблица 3

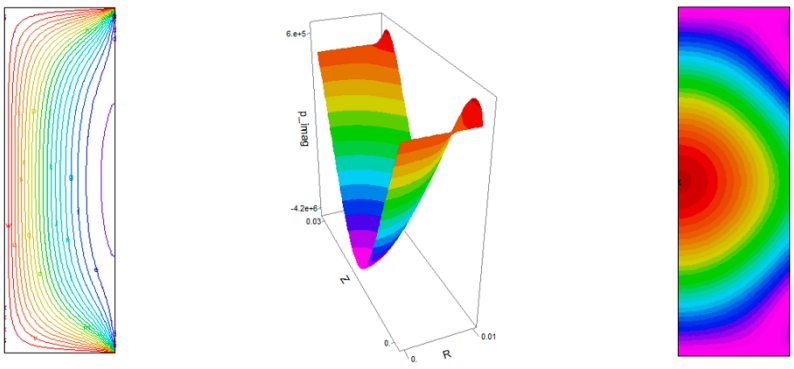
Собственные частоты

Мода	Эксперимент	ACELAN
Осевая (КГц)	55.5	57.97
Радиальная (КГц)	77.6	75.82
Толщинная (МГц)	2.394	2.398

При решении задачи об установившихся колебаниях строится распределение поля скоростей и давлений в акустической среде. По соотношению (2) определяется внутренний источник тепловыделения и далее в конечно-элементном пакете FlexPDE решается нестационарная задача (1) о разогреве акустической среды [5].

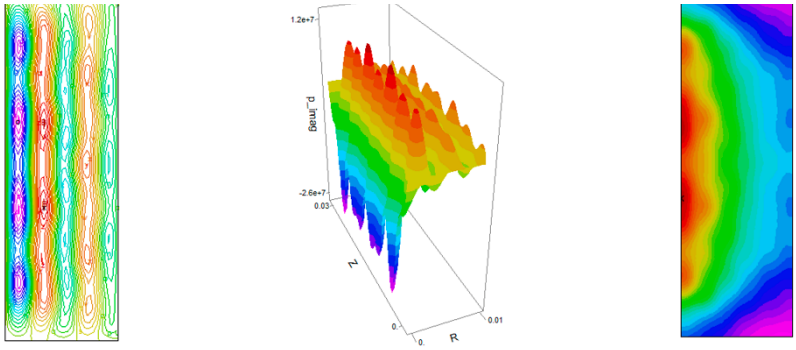
Так на рисунке 3 представлено распределение поля горизонтальной скорости, амплитуды давления p и температуры на круговой частоте 300000 с$^{-1}$.

На рисунке 4 представлены аналогичные результаты для «стоячей» волны в акустической среде в высокочастотной области.



(*а*) (*б*) (*в*)

Рис. 3. Распределение горизонтальной скорости (*а*), давления (*б*) и температуры (*в*) на круговой частоте 300000 с$^{-1}$.



(*а*) (*б*) (*в*)

Рис. 4. Распределение горизонтальной скорости (*а*), давления (*б*), температуры (*в*) в высокочастотной области.

Заключение

В работе проведен эксперимент по высокочастотному разогреву биологических тканей полыми цилиндрическими пьезоэлементами. Предложен алгоритм математического и компьютерного моделирования такого эксперимента. Алгоритм состоит из последовательного решения задачи об установившихся колебаниях пьезоэлемента в акустической среде, определения поля давлений в ней. По полю давлений строится внутренний источник тепловыделения и решается нестационарная задача о разогреве. Построенная модель хорошо согласуется с данными натурного эксперимента и может быть использована для инструмент контроля за адекватностью работы приборов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-11-00302-П, https://rscf.ru/project/22-11-00302-P/ в Южном федеральном университете.

Список литературы

1. *Гаврилов Л.Р.* Фокусируемый ультразвук высокой интенсивности в медицине. Изд-во ФАЗИС, Москва, 2013. 659 с.

2. *Партон В.З., Кудрявцев Б.А.* Электромагнитоупругость пьезоэлектрических и электропроводных тел. Изд-во ФИЗМАТЛИТ, Москва, 1988. 472 с.

3. *Красильников В.А., Крылов В.В.* Введение в физическую акустику. Изд-во Наука, Москва, 1984. 640 с.

4. *Наседкин А.В., Скалиух А.С., Соловьев А.Н.* Пакет ACELAN и конечно-элементное моделирование гидроакустических пьезопреобразователей // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естесств. науки. Спецвыпуск. Математическое моделирование. 2001. С. 122.

5. *Соловьев А.Н., Рыбянец А.Н., Оганесян П.А., Германчук М.С., Фоменко Е.И.* Высокочастотный разогрев биологических тканей цилиндрическим пьезоэлементом // Сб. матер. IV Межд. научно-практ. конф. «Инновационные направления интеграции науки, образования и производства». 2023. С. 59.

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39651

Сфокусированный ультразвук в комбинированной терапии глиобластомы: открытие барьера для доставки лекарств и сонодинамическая терапия

Т.О. Абакумова

РНИМУ им. Н.И. Пирогова Минздрава России (Пироговский Университет), г.Москва
Тел.: 8-917-506-30-27; E-mail: sandalovato@gmail.com

Сфокусированный ультразвук представляет собой перспективный неинвазивный подход в нейроонкологии, позволяющий временно повышать проницаемость гематоэнцефалического барьера и улучшать доставку противоопухолевых препаратов в ткань мозга. Для глиобластомы этот метод особенно актуален, поскольку опухоль характеризуется высокой инвазивностью, выраженной лекарственной резистентностью, иммуносупрессивным микроокружением и ограниченной эффективностью системной терапии. В последние годы сфокусированный ультразвук рассматривается не только как способ улучшения доставки лекарств, но и как перспективная платформа для сонодинамической терапии глиобластомы.. Целью работы было разработать и оптимизировать комбинированные подходы с использованием сфокусированного ультразвука для доставки лекарств и сонодинамической терапии глиобластомы. Были синтезированы липосомы на основе олеиновой кислоты, нагруженные темозоломидом, и разработаны формуляции на основе гиперицина — нового соносенсибилизатора. Протоколы низко- и высокоинтенсивного ультразвука были оптимизированы для временного открытия гематоэнцефалического барьера, контролируемого разрушения липосом и активации сонодинамического эффекта в безопасном диапазоне акустического давления. Показано, что полученные препараты селективно накапливаются в опухоли и обеспечивают выраженную генерацию активных форм кислорода при воздействии сфокусированного ультразвука, что усиливает гибель клеток глиомы. Стимул-чувствительное разрушение липосом существенно увеличивает доставку темозоломида в опухолевую ткань при сохранении благоприятного профиля безопасности. Совместное применение ультразвук-чувствительных систем доставки лекарств и сонодинамической терапии обеспечивает синергетический противоопухолевый эффект и представляет перспективный подход к лечению глиобластомы.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 22-75-10151-П.

Ключевые слова: фокусированный ультразвук, липосомы, сонодинамическая терапия

Focused Ultrasound in Combined Glioblastoma Therapy: Blood–Brain Barrier Opening and Sonodynamic Treatment

T.O. Abakumova

Pirogov Russian National Research Medical University, Moscow, Russia

Tel.: +7 (917) 506-30-27; E-mail: sandalovato@gmail.com

Focused ultrasound represents a promising noninvasive approach in neurooncology that enables transient enhancement of the blood–brain barrier (BBB) permeability and improves the delivery of anticancer agents to brain tissue. For glioblastoma, this strategy is particularly relevant since the tumor is characterized by high invasiveness, pronounced drug resistance, an immunosuppressive microenvironment, and limited efficacy of systemic therapies. In recent years, focused ultrasound has been viewed not only as a means of enhancing drug delivery but also as a prospective platform for sonodynamic therapy of glioblastoma. The aim of this study was to develop and optimize combined approaches employing focused ultrasound for drug delivery and sonodynamic therapy of glioblastoma. Oleic acid–based liposomes loaded with temozolomide were synthesized, and hypericin-based formulations were designed as new sonosensitizers. Low- and high-intensity ultrasound protocols were optimized for transient BBB opening, controlled liposome disruption, and activation of the sonodynamic effect within a safe acoustic pressure range. The obtained formulations selectively accumulated in the tumor and provided pronounced reactive oxygen species generation under focused ultrasound exposure, resulting in enhanced glioma cell death. Stimuli-responsive liposome disruption significantly increased temozolomide delivery to the tumor tissue while maintaining a favorable safety profile. The combined application of ultrasound-responsive drug delivery systems and sonodynamic therapy produced a synergistic antitumor effect, offering a promising approach for glioblastoma treatment.

This work was supported by the grant of RSF 22-75-10151-P

Keywords: focused ultrasound, liposomes, sonodynamic therapy

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39652

РАЗРАБОТКА ПОДХОДОВ К СОНОДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕРАПИИ ГЛИОБЛАСТОМЫ С ПОМОЩЬЮ СФОКУСИРОВАННОГО УЛЬТРАЗВУКА

Далинина В.Д.[1)], Медведев Д.Ю.[2)], Шашковская В.С.[1)], Мамлеев А.Р.[3)], Островерхов П.В.[2)], Абакумова Т.О.[1)]

[1)]Российский национальный исследовательский университет имени Н.И. Пирогова, Россия, 117997, Москва, ул. Островитянова, дом 1, строение 6;
[2)]ФГБОУ ВО «МИРЭА — Российский технологический университет», Институт тонких химических технологий, Россия, 119571, Москва, проспект Вернадского, дом 86.;
[3)]ООО «Лифт центр», Россия, 121205, Москва, территория инновационного центра «Сколково», Большой бульвар, д. 30, стр. 1.
Тел.: (915 0816417);
E-mail: vdalinina@gmail.com

Сонодинамическая терапия с помощью сфокусированного ультразвука – это перспективный неинвазивный метод в области терапии глиобластом, основанный на таргетной активации генерации активных форм кислорода (АФК) соносенсебилизаторами (СС), специфично накапливающимися в опухолевых клетках. В ходе данной работы были исследованы соносенсебилизаторы хлорин е6, 5-аминолевулиновая кислота, а также перспективный, но малоизученный СС гиперицин, обладающий высокой способностью к накоплению в опухолевых клетках, но низкой растворимостью в биологических средах. Для солюбилизации и оптимизации системной доставки гиперицина были разработаны носители на основе мицелл с гидродинамическим диаметром 46,7 нм (± 5,9 нм) и липосом с гидродинамическим диаметром 167,5 нм (± 1,7 нм). На мышиной модели глиобластомы была исследована динамика накопления и биораспределение солюбилизированных форм гиперицина. На клеточной культуре мышиной глиобластомы GL261 была исследована цитотоксичность СС и сфокусированного ультразвука как отдельно так и в комбинации. Также, на культуре GL261 была исследована способность СС к генерации активных форм кислорода. В результате данного исследования были получены и охарактеризованы солюбилизированные формы гиперицина и их биораспределение. Для рассмотренных соносенсебилизаторов была оценена цитотоксичность и способность к генерации АФК, а также были разработаны протоколы соникации на культуре клеток GL261.

Работы были выполнены при поддержке гранта РНФ 22-75-10151-П.

Ключевые слова: соносенсебилизатор, активные формы кислорода, сфокусированный ультразвук

EVALUATION OF SONOSENSETIZERS AND ULSTRASOUND MODALITIES FOR SONODYNAMIC THERAPY OF GLIOBLASTOMA

V.D. Dalinina[1)], D.U. Medvedev[2)], V.S. Shashkovskaya[1)], A.P. Mamleev[3)], P.V. Ostroverkhov[2)], T.O. Abakumova[1)]

[1)]Pirogov Russian National Medical University, Moscow, 117997, Russia;
[2)]MIREA - Russian Technological University, Institute of Fine Chemical Technologies, Moscow, 119571, Russia;
[3)]Life Improvement by Future Technologies (LIFT), Moscow, 121205, Russia.
E-mail: vdalinina@gmail.com

Sonodynamic therapy is a promising non-invasive approach in the treatment of glioblastoma, based on the precise activation of reactive oxygen species (ROS) generation by sonosensitizers (SS) that specifically accumulate in tumor cells. In this study, the sonosensitizers chlorin e6, 5-aminolevulinic acid, as well as the promising but under-researched hypericin, which exhibits a high capacity for accumulation in tumor cells but poor solubility in biological media, were investigated. To improve solubility and optimize systemic delivery of hypericin, micellar carriers with a hydrodynamic diameter of 46.7 nm (± 5.9 nm) and liposomes with a hydrodynamic diameter of 167.5 nm (± 1.7 nm) were developed. The accumulation dynamics and biodistribution of the solubilized forms of hypericin were studied in a mouse model of glioblastoma. The cytotoxicity of sonosensitizers and focused ultrasound, both individually and in combination, was investigated using the GL261 mouse glioblastoma cell line. Additionally, the ability of the sonosensitizers to generate reactive oxygen species was studied in GL261 cell cultures. As a result of this study, solubilized forms of hypericin and their biodistribution were obtained and characterized. For the sonosensitizers examined, cytotoxicity and ROS generation capacity were assessed, and sonication protocols for the GL261 cell culture were developed. This work was supported by the grant, Russian Science Foundation 22-75-10151-П.

Keywords: sonosensitizer, reactive oxygen species, focused ultrasound

УДК: 534.2 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39653

Комбинация электронного и механического перемещения фокуса многоэлементной ультразвуковой решетки при транскраниальном облучении мозга

Чупова Д.Д.[1,2], Крохмаль А.А.[1], Росницкий П.Б. [1,2], Солонцов О.В. [1], Синицын В.Е.[3], Мершина Е.А.[3], Сапожников О.А.[1], Хохлова В.А.[1]

[1] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва;

[2] Федеральный центр мозга и нейротехнологий ФМБА России, г. Москва;

[3] Университетская клиника МНОИ МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва;

Тел.: +7(495) 9392952; Факс: +7(495) 9392952

E-mail: daria.chupova@yandex.ru

В настоящее время активно развивается ультразвуковой (УЗ) метод транскраниального воздействия на мозг человека для абляции опухолей, открытия гематоэнцефалического барьера и нейромодуляции. С помощью многоэлементного излучателя УЗ пучок фокусируется через невскрытый череп в заданную область мозга, при этом фокус может перемещаться как электронно, за счет изменения фаз на элементах, так и механически. Широко используемая полусферическая решетка клинической системы ExAblate Neuro (Israel) имеет ограничения – невозможность воздействовать на участки мозга, удаленные от области таламуса более чем на ±2.5 см. С целью расширить доступную область лечения был разработан новый класс мозаичных решеток с абсолютно плотным заполнением поверхности элементами и меньшим углом раскрыва. С помощью программы *k*-Wave было проведено моделирование фокусировки пучка 256-элементного 1-МГц излучателя с компенсацией аберраций. Фокус перемещался как электронно, так и механически, путем смещения и поворота решетки относительно черепа. Получено, что комбинация механического и электронного перемещения фокуса в продольном направлении оси излучателя позволяет сфокусировать пучок на расстоянии около 1.5 см от внутренней поверхности черепа при уменьшении интенсивности в фокусе на 50%. Поперечное механическое перемещение фокуса позволило расширить область облучения до 4.3 см, а дополнительный поворот излучателя – увеличить интенсивность в граничных положениях фокуса до 1.8 раз. Работа поддержана грантом РНФ №25-12-00141.

Ключевые слова: многоэлементные решетки, медицинский ультразвук, ультразвуковая транскраниальная хирургия, компьютерная томография.

Combination of electronic and mechanical focus shift of a multi-element ultrasound array during transcranial ablation of the brain

D.D. Chupova[1,2], A.A. Krokhmal[1], P.B. Rosnitskiy[1,2], O.V. Solontsov[1], V.E. Sinitsyn[3], E.A. Mershina[3], O.A. Sapozhnikov[1], V.A. Khokhlova[1]

[1]*Faculty of Physics, M.V.Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia.*

[2] *Federal Center of Brain Research and Neurotechnology of FMBA of Russia, Moscow 117513, Russia.*

[3] *University Clinic, Medical Research and Educational Institute, Moscow 119192, Russia*

E-mail: *daria.chupova@yandex.ru*

Currently, ultrasound (US) is an actively developing method of transcranial intervention in the human brain for tumor ablation, the blood-brain barrier opening, and neuromodulation. Using a multi-element array, the ultrasound beam is focused through the intact skull into a target area of the brain. The focus can be shifted both electronically, by changing the phases of the elements, and mechanically. The widely used hemispherical array of the ExAblate Neuro clinical system (Israel) has limitations. It cannot target areas of the brain located more than ±2.5 cm from the thalamus. To expand the accessible treatment area, a new class of mosaic arrays with an absolutely dense surface filling with elements and a smaller aperture angle was developed. Using *k*-Wave software, beam focusing was simulated for a 256-element 1-MHz array with aberration compensation. The focus was shifted both electronically and mechanically, by shifting and rotating the array relative to the skull. It was found that a combination of mechanical and electronic focus movement along the array axis allowed the beam to be focused at a distance of approximately 1.5 cm from the inner surface of the skull, while reducing the focal intensity by 50%. Transverse mechanical focus shifts allowed the ablation area to be expanded to 4.3 cm, while additional array rotation increased the intensity at the focal limit by up to 1.8 times. This work was supported by Russian Science Foundation grant #25-12-00141.

Keywords: multi-element arrays, medical ultrasound, transcranial ultrasound surgery, computed tomography.

УДК: 534.2. DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39654

Бинарная сегментация ультразвуковых изображений с использованием нейронных сетей для компенсации аберраций при HIFU-терапии

Ф.А. Нартов[1,a], П.Б. Росницкий[1], Е.М. Пономарчук[1], В.А. Хохлова[1]

[1] *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.*

E-mail: [a]*nartov.fyodor@gmail.com*

При использовании мощного фокусированного ультразвука в задачах неинвазивной хирургии абдоминальных органов (печень, почки, поджелудочная железа) прохождение волн через неоднородные мягкие ткани брюшной стенки приводит к искажению волнового фронта и последующей расфокусировке пучка. Наиболее существенно на наблюдаемые искажения влияет распространение волн в неоднородных по толщине слоях жира, сильно отличающегося по акустическим свойствам от других тканей. Использование двумерных фазированных HIFU-решеток позволяет компенсировать возникающие аберрации при известном пространственном распределении жировой ткани на пути распространения ультразвуковой волны. Такие распределения могут быть наиболее точно восстановлены с помощью данных рентгеновской компьютерной томографии (КТ), что, однако, нереализуемо в режиме реального времени во время планирования облучения. Альтернативой может послужить проведение трёхмерной ультразвуковой визуализации брюшной стенки (3D-УЗИ) непосредственно перед HIFU-операцией. Данный подход состоит в получении набора двумерных изображений УЗИ, расположенных в параллельных плоскостях с одинаковым пространственным шагом, сегментации изображений на различные типы тканей и присвоении им соответствующих акустических параметров для расчета корректирующих фаз на элементах решетки. В данной работе на примере брюшной стенки свиньи *ex vivo* анализируется реализуемость предлагаемого подхода. Разработан метод быстрой бинарной сегментации тканей брюшной полости по УЗИ-изображениям с использованием обученной сверточной нейронной сети. Сравниваются искажение и точность компенсации аберраций по данным 3D-УЗИ и эталонным данным КТ. Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №25-12-00157.

Ключевые слова: медицинский ультразвук, HIFU, искусственный интеллект, сегментация.

Binary Segmentation Of Ultrasound Images Using Neural Networks To Compensate For Aberrations In HIFU Therapy

F.A. Nartov[1,a], P.B. Rosnitskiy[1], E.M. Ponomarchuk[1], V.A. Khokhlova[1]

[1] *Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia.*

E-mail: [a]nartov.fyodor@gmail.com

When using high-intensity focused ultrasound in non-invasive surgery of abdominal organs (liver, kidneys, pancreas), the passage of waves through the heterogeneous soft tissues of the abdominal wall leads to distortion of the wavefront and subsequent defocusing of the beam. The observed distortions are most significantly influenced by wave propagation through layers of fat that vary in thickness and differ greatly in acoustic properties from other tissues. The use of two-dimensional phased HIFU arrays allows for the compensation of resulting aberrations given the known spatial distribution of adipose tissue along the path of the ultrasonic wave. Such distributions can be most accurately reconstructed using computed tomography (CT) data; however, this is not feasible in real time during treatment planning. An alternative is to perform three-dimensional ultrasound imaging of the abdominal wall (3D ultrasound) immediately prior to the HIFU procedure. This approach involves acquiring a set of two-dimensional ultrasound images arranged in parallel planes with the same spatial step, segmenting the images into different tissue types, and assigning them corresponding acoustic parameters to calculate correction phases on the grid elements. In this work, the feasibility of the proposed approach is analyzed using the example of a porcine abdominal wall *ex vivo*. A method has been developed for rapid binary segmentation of abdominal tissues based on ultrasound images using a trained convolutional neural network. The distortion and accuracy of aberration compensation are compared based on 3D ultrasound data and reference CT data. This work was supported by RSF grant No. 25-12-00157.

Keywords: medical ultrasound, HIFU, artificial intelligence, segmentation.

PACS: 43.35.Bf

УДК: 534.7 DOI: 10.34756/GEOS.2026.17.39655

Влияние упругих свойств и структуры биотканей на их восприимчивость к механическому разрушению фокусированным ультразвуком

Пономарчук Е.М.[1,a], Цысарь С.А.[1], Данилова Н.В. [2], Кадрев А.В. [2,3], Хохлова В.А.[1]

[1] *МГУ имени М.В. Ломоносова, физический факультет, г. Москва*

[2] *МГУ имени М.В. Ломоносова, Медицинский научно-образовательный институт, г. Москва*

[3]*Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования, г. Москва*

E-mail: msu.ekaterina.ponomarchuk@gmail.com

В качестве альтернативы существующим методам хирургии в МГУ был предложен и активно развивается метод гистотрипсии с кипением (ГК). Данная технология бесконтактной ультразвуковой хирургии основана на фокусировке нелинейных импульсно-периодических волн с ударными фронтами в задаваемые участки тела человека для их механического разрушения до жидкого состояния. Процедура проводится под УЗИ-контролем за счет инициации кавитационной активности в фокальной области ультразвукового пучка. В работе проанализированы результаты проведенных в лаборатории многопараметрических экспериментальных *ex vivo* исследований на здоровых тканях печени, почек, сердца и головного мозга, а также опухолях молочной железы, предстательной железы, печени, органов желудочно-кишечного тракта, матки и др. Упругие свойства рассматриваемых тканей были измерены методом эластографии сдвиговой волной, микро- и ультраструктура исследовались методами гистологического анализа и электронной микроскопии. Проанализированы полученные объемные ГК-разрушения при варьируемых протоколах воздействия. Рассмотрены концепции дозы ГК-воздействия и ее пороговых и оптимальных значений для тканей разной структуры и состава, определены свойства тканей, влияющие на их восприимчивость к ГК-разрушению и, соответственно, требуемую дозу воздействия. Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №25-12-00157.

Ключевые слова: мощный фокусированный ультразвук, неинвазивная хирургия, гистотрипсия, онкология, эластография

The influence of elastic properties and structure of biological tissues on their susceptibility to mechanical fractionation with focused ultrasound

Ponomarchuk E.M.[1,a], Tsysar S.A.[1], Danilova N.V. [2], Kadrev A.V. [2,3], Khokhlova V.A.[1]

[1] *Faculty of Physics, M.V.Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia.*

[2] *Medical Research and Educational Institute, M.V.Lomonosov Moscow State University. Moscow 119234, Russia*

[3] *Russian Medical Academy of Continuous Professional Education. Moscow 125445, Russia*

E-mail: msu.ekaterina.ponomarchuk@gmail.com

As an alternative to existing surgical modalities, a method of boiling histotripsy (BH) has been proposed and is actively developing at Moscow State University. This incisionless ultrasound surgery technology is based on focusing nonlinear pulsed-periodic waves with shock fronts on the targeted areas in the human body to mechanically fractionate them into a liquid state. The procedure is performed under ultrasound guidance due to initiating cavitation activity in the focal area of the ultrasound beam. This work analyzes the results of multiparametric *ex vivo* experimental studies conducted at the authors' laboratory on healthy liver, kidney, heart, and brain tissues, as well as tumors in breast, prostate, liver, gastrointestinal tract, uterus, and other organs. The elastic properties of the tissues were measured using shear wave elastography, and their microstructure and ultrastructure were examined using histological analysis and electron microscopy. The resulting volumetric BH lesions obtained with varied exposure protocols were analyzed. The concepts of BH exposure dose and its threshold and optimal values for tissues of different structure and composition were examined. The tissue properties influencing their susceptibility to BH fractionation and, accordingly, the required exposure dose were determined. The work was supported by RSF grant 25-12-00157.

Keywords: high-intensity focused ultrasound, non-invasive surgery, histotripsy, oncology, elastography

PACS: 43.25.+y; 43.35.Yb; 43.60.−c; 87.50.−a; 87.19.xj

УДК: 534.64 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39656

Исследование вязкоупругих свойств биологической ткани вибрационным импедансным методом

В.В. Казаков[1,a], **С.В. Немирова**[1,b], **А.А. Петушков**[1,c], **Д.Н. Елистратова**[1,d]

[1] *ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В.Гапонова-Грехова РАН» 603951, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46*
E-mail: [a]kazak@ipfran.ru, [b]nemirova.info@gmail.com, [c]leshafsfp@gmail.com, [d]darinastudy@yandex.ru

Аннотация: Цель данной работы заключалась в создании нового метода измерения вязкоупругих свойств локального участка биологической ткани на основе исследования сдвиговых колебаний биморфного пьезоэлектрического элемента (биморфа), контактирующего с ней или вдавливаемого в нее. Он предназначен для решения задачи выявления связи между изменением упругих свойств определенного участка биологической ткани и сопутствующим этому изменению заболеванию или травмы, в частности - между тканями верхних и нижних конечностей человека в норме и при атеросклеротическом поражении сосудов, развитии диабета. Разработано два способа измерения реальной и мнимой частей электрического импеданса биморфа: цифровой − использующий запись опорного и измеряемого сигналов в микроконтроллер и индикации результата измерения на ЖКИ дисплее, и аналоговый − использующий квадратурное детектирование сигналов. Изготовлен портативный макет измерителя импеданса. Приведены предварительные результаты экспериментов по измерению упругих свойств различных модельных объектов и участков тела человека в зависимости от глубины вдавливания биморфа, частоты возбуждения и его пошаговом перемещении по поверхности.

Ключевые слова: импедансный метод, вязкоупругие свойства биологической ткани.

Investigation of viscoelastic properties of biological tissue by vibration impedance method

V.V. Kazakov[1,a], **S.V. Nemirova**[1,b], **A.A. Petushkov**[1,c], **D.N. Elistratova**[1,d]

Federal Research Center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the RAS, 46 Ul'yanov Street, Nizhny Novgorod, 603951, Russia

E-mail: [a]kazak@ipfran.ru, [b]nemirova.info@gmail.com, [c]leshafsfp@gmail.com, [d]darinastudy@yandex.ru

Abstract: The purpose of this work was to create a new method for measuring the viscoelastic properties of a local area of biological tissue based on the study of shear vibrations of a bimorphic piezoelectric

element (bimorph) in contact with it or pressed into it. It is designed to solve the problem of identifying the relationship between a change in the elastic properties of a certain area of biological tissue and a concomitant disease or injury, in particular, between the tissues of the upper and lower extremities of a person in normal and atherosclerotic vascular lesions, the development of diabetes. Two methods have been developed for measuring the real and imaginary parts of the electrical impedance of a bimorph: digital, which uses recording of reference and measured signals into a microcontroller and displaying the measurement result on an LCD display, and analog, which uses quadrature signal detection. A portable model of the impedance meter has been made. The preliminary results of experiments on measuring the elastic properties of various model objects and areas of the human body are presented, depending on the depth of the bimorph indentation, the frequency of excitation and its step-by-step movement along the surface.

Keywords: impedance method, viscoelastic properties of biological tissue.

PACS: 07.07.Mp

Введение

Существует большое количество задач медицинской диагностики, для решения которых необходимо исследовать и сравнивать вязкоупругие свойства различных участков биологической ткани. Актуальность задачи привела к созданию самых разнообразных методов измерения: от электрических и оптических до акустических. Простейший метод заключается в использовании пальпации, однако достоверность исследований целиком зависит от квалификации и опыта врача. Классическими методами исследования являются квазистатические методы, основанные на вдавливании в поверхность биоткани индентора с плоским или сферическим наконечником и измерении деформационно-нагрузочных характеристик, по которым рассчитывают модуль упругости или сдвига [1–3]. Широко используются измерители электрического импеданса биоткани, кутометры.

Основная решаемая задача заключается в том, чтобы объективизировать измерения, сделать их достоверными, количественно сравнимыми и независимыми от опыта врача. При этом важно обеспечить информационность и локальность измерений, с тем чтобы сравнивать свойства различных участков биоткани между собой, иметь возможность строить распределения изменения вязкоупругих свойств по поверхности и проводить мониторинг их изменения с течением времени. Ее предлагается решить путем создания метода измерения, основанного на анализе колебаний биморфного пьезоэлемента, контактирующего с биологической тканью [4, 5]. В данной работе проводятся результаты комплексных исследований по выявлению особенностей изменения импеданса биморфного пьезоэлемента (биморфа), возбуждаемого на резонансной частоте в диапазоне 0.5–1.5 кГц, в зависимости от свойств биологических тканей или модельных

объектов и способа обработки получаемых данных. Предполагается, что в результате проведенных исследований будет создан простой в использовании и достаточно информативный портативный измеритель импеданса, использующий в качестве координатного устройства руку человека и пригодный для использования как в клинике, так и для проведения лабораторных исследований.

1 Метод измерения

Разрабатываемый метод определения вязкоупругих свойств поверхностного слоя биологической ткани основан на анализе сдвиговых колебаний вдавливаемого в нее торца биморфа на глубину 0.5−2 мм. Консольно закрепленный биморф, имеющий размер 6x20x0.5 мм, в зависимости от крепления совершает изгибные колебания на резонансной частоте в диапазоне частот f = 0.5−1.5 кГц. Вместе с устройством демпфирования защемленного конца и платой предусилителя он размещен в корпусе датчика, имеющего вид цилиндра диаметром 16 мм и длиной 146 мм, и имеет устройство защиты при хранении.

Биологическая ткань имеет сложную слоистую структуру, для описания которой используются различные модели вязкоупругих сред. На данном этапе работы исследования взаимодействия биморфа с различными объектами проводились экспериментально. Для измерения реальной и мнимой частей электрического импеданса Z биморфа в полосе частот использовался измеритель *RLC-78110G* (GwInstek). В разработанном портативном макете измерителя использовался биморф, поверхность которого разделена на две секции: одна использовалась для его возбуждения напряжением $U_0(t)$, а вторая – для съема сигнала $U_1(t)$ о его колебании. Важно было увидеть изменения сигналов при таком способе проведения измерений. Измерялись средние значения двух компонент исследуемого сигнала: реальной $Re(U_1)=U_0\cdot\cos(\omega t)\cdot U_1(t)$, связанной с изменением упругости, и мнимой $Re(U_1)=U_0\cdot\sin(\omega t)\cdot U_1(t)$, связанной с изменением вязкости, или их модуля $|U|$ и разности фаз $\Delta\varphi$. Разработано два способа измерения реальной и мнимой частей: цифровой и аналоговый. Цифровой способ основан на записи в память микроконтроллера *MSP430F247* сигналов $U_0(t)$ и $U_1(t)$ длительностью 500 отсчетов каждый, причем на один период частоты возбуждения приходилось 32 отсчета, что было обеспечено синхронной работой двух цифровых синтезаторов частоты. Это позволило проводить квадратурную обработку данных и выводить результаты на двухстрочный ЖКИ дисплей. Аналоговый способ основан на квадратурном детектировании этих же сигналов с помощью аналоговых и цифровых микросхем и непрерывной регистрацией сигналов с помощью внешнего *АЦП E14-140* (Л-Кард). Для измерения глубины вдавливания R использовались: стационарное координатное устройство; бесконтактный фазовый измеритель перемещений по схеме измерения приведенной в работе [6] или рука оператора.

2 Результаты экспериментов

В качестве модельных объектов использовались образцы из агар-агара с различными значениями модуля сдвига G (в зависимости от концентрации): 1 − 0.8 кПа (0.5%), 2 − 1.7 кПа (1.0%), 3 − 15.3 кПа (2.0%), 4 − 47.5 кПа (4.0%) и различные силиконы, в частности: 5 – вязкий с G = 4.8 кПа и 6 – вязкий с тонким упругим слоем 0.5 мм и G = 8.2 кПа. На рис. 1 *а*, *б* приведены изменения реальной и мнимой частей сигнала с биморфа, возбужденного на резонансной частоте 930 Гц.

Биморф вдавливался в поверхность с помощью координатного устройства с шагом ΔR = 0.2 мм. Хорошо видно, что для однородных образцов начиная с глубины 0.4 мм составляющие импеданса изменяются незначительно, то есть для них можно проводить измерения, вдавливая биморф рукой при простом визуальном контроле. Составляющие вязкого (5) и слоистого (6) силиконов уже зависят от глубины вдавливания. Это хорошо видно, если представить данные в различных координатах (рис. 2 *а*, *б*). Направление увеличения глубины показано стрелками.

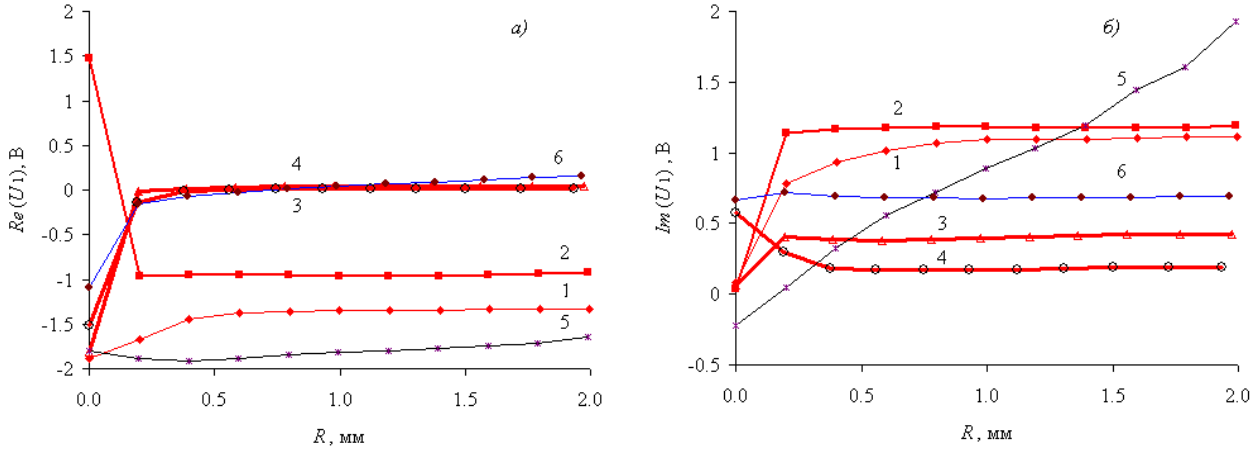


Рис. 1. Изменение реальной (*а*) и мнимой (*б*) частей сигнала при вдавливании биморфа в модельные образцы.

Тенденция изменения величины модуля сдвиговой упругости совпадает с изменением значений обеих частей сигнала U_1(t). Используемый биморф имеет ограничение по динамическому диапазону: в области значений больших упругостей нарушаются граничные условия защемленного конца. Представление данных в координатах «модуль – фаза» (рис. 2 *б*) и визуальном контроле на дисплее только значения модуля сигнала более наглядно и позволяет быстро оценивать упругие свойства исследуемой области объекта.

Эксперименты с биотканями проводились путем измерения импеданса *RLC*-метром в частотном диапазоне 0.7−1.3 кГц. В качестве участков тела использовались: 11 − предплечье снаружи, 12 − веко, 13 − предплечье с тыльной стороны, 14 − щека, 15 – область между

указательным и большим пальцем, 16 − фаланга указательного пальца, 17 − подушечка указательного пальца, 18 – запястье. Результаты измерений приведены на рис. 3 *а*, *б*.

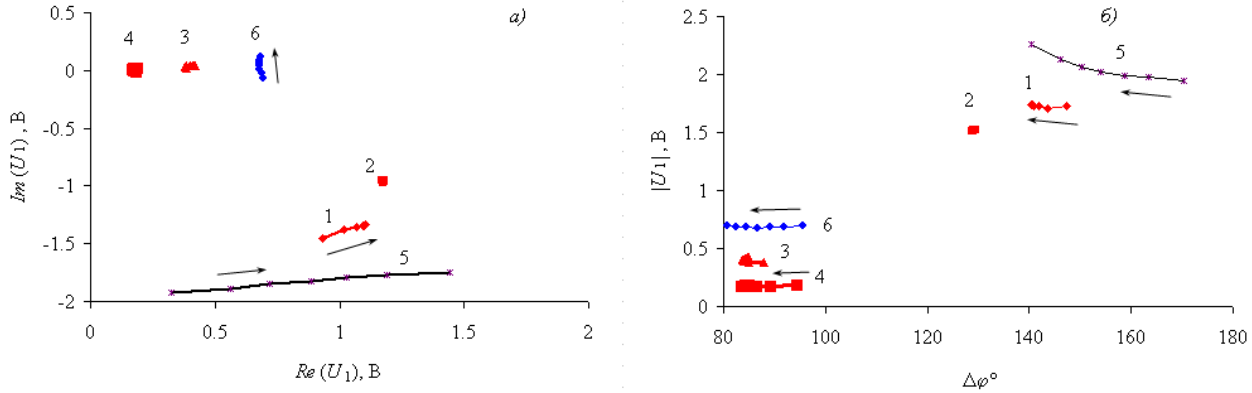


Рис. 2. Изменение реальной и мнимой частей сигнала (*а*) и его модуля и сдвига фаз (*б*) при вдавливании.

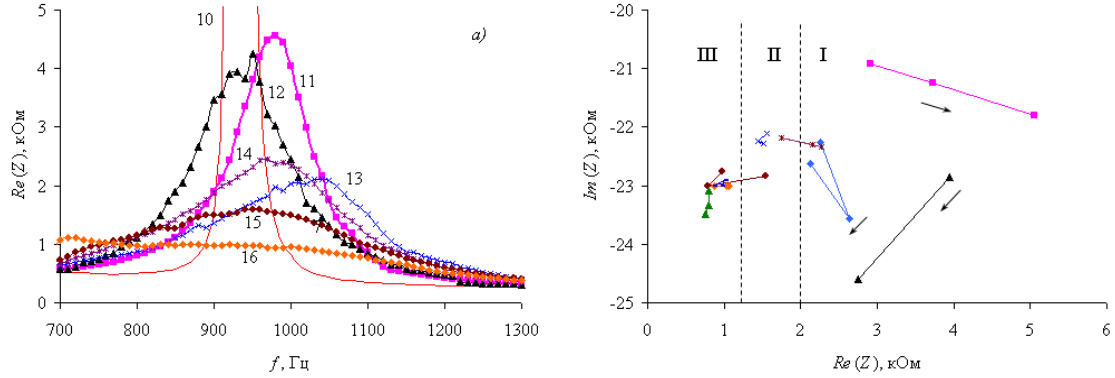


Рис. 3. Изменение реальной части импеданса биморфа для различных участков тела человека в зависимости от частоты возбуждения (*а*) и мнимой части импеданса от реальной (*б*).

Цифрой 10 обозначена часть частотной зависимости при колебании биморфа в воздухе. Глубина вдавливания составляла: 0.5, 0.75, 1.0 мм. Из рис. 3 *а*, *б* видно, что в зависимости от ткани биморф может проявлять или не проявлять резонансные свойства и ткани условно можно разделить по упругости на мягкие (I) – 11, 12, средние (II) – 13, 14 и жесткие (III) – 15, 16, 17. Результаты измерений, в отличии от однородных силиконов, уже зависят от глубины вдавливания.

На рис. 4 приведено изменение модуля сигнала с биморфа, получаемое при сканировании рукой датчика измерителя с шагом 2 мм (11 отсчетов), перпендикулярно вене на предплечье (ее положение отмечено линией) для разных глубин вдавливания, определяемых с помощью ультразвукового измерителя [6]. Общее время проведения измерений составляло около 40 секунд. Из рисунков видно, что разработанный метод позволяет исследовать изменение упругих свойств по поверхности биологического объекта и результат так же зависит от глубины вдавливания.

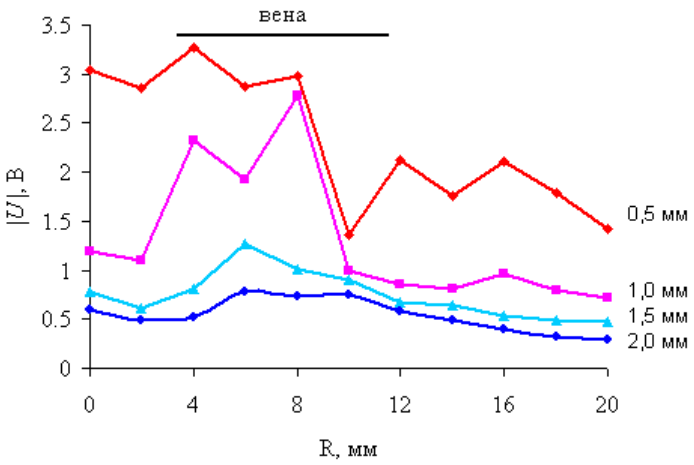


Рис. 4. Изменение модуля сигнала с биморфа при перемещении датчика поперек вены на руке.

Заключение

Полученные результаты показывают, что диагностика вязкоупругих свойств биологической ткани может быть проведена по измерению импеданса биморфного пьезоэлемента, вдавливаемого в нее с помощью координатного устройства или руки. Информационность данного метода выше, чем при использовании квазистатического. Хорошо различаются модельные объекты из силикона и биологические ткани. Доступными для оперативного исследования являются такие деликатные мягкие ткани как веко. Интересной для анализа является характер изменения деформационно-нагрузочных характеристик: слабая зависимость одной из квадратурных составляющих от глубины вдавливания, изменяющаяся при смене частоты возбуждения биморфа.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-25-00707.

Список литературы

1. *Сомкин П.Б.* Обзор аппаратных методов исследования кожного покрова человека и его механических свойств / Сб. тр. СевКавГТУ. Сер. Естественнонаучная. 2007. № 3. С. 214.

2. *Egorov V., Tsyuryupa S., Kanilo S., Kogit M., Sarvazyan A.* Soft tissue elastometer // Medical Engineering & Physics. 2008. **30**, N 2 :206-12.

3. *Гурбатов С.Н., Демин И.Ю., Прончатов-Рубцов Н.В.* Ультразвуковая эластография: аналитическое описание различных режимов и технологий, физическое и численное моделирование сдвиговых характеристик мягких биологических тканей. Нижний Новгород : ННГУ. 2015.

4. *Вилов С.А., Казаков В.В.* Метод определения вязкоупругих характеристик биологических тканей // Вестник НГУ. 2014. №1(2). С.150.

5. *Chen Y., Lemaire-Semail B., Giraud F., Hayward V.* A piezoelectric based sensor system designed for in vivo skin biomechanical measurements // Sensors & Actuators: A. Physical. 2023. 351: 114168.

6. *Kazakov V., Kravets L., Sheludiakov A.* A Method for Studying of the Stress-Strain Relationships of the Human Brain in Vivo // Surgical Medicine Open Access Journal. 2024. **5**, N5. SMOAJ.000623.

УДК: 53.082.4:616-71 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39657

Методы и средства определения акустических характеристик тканеимитирующих материалов

А.А. Гелашвили[1,a], С.И. Кузнецов[1,b], Г.С. Лукин[1, c]

[1] *ФГУП «ВНИИФТРИ», пгт. Менделеево 141570, Россия.*

E-mail: [a]gelashvili@vniiftri.ru, [b]sergantex@vniiftri.ru, [c]lukin@vniiftri.ru

Аннотация: Рассмотрены проблемы обеспечения единства измерений для материалов с близкими к биологическим тканям акустическими характеристиками, а также безэховых материалов. Указанные материалы применяются в составе акустических мер для контроля технического состояния ультразвукового медицинского оборудования и обучения специалистов. Проведён анализ применимости к этим материалам отечественных и международных стандартов, регламентирующих термины и методы акустических измерений.

Ключевые слова: акустическая мера, обеспечение единства измерений, тканеиммитирующий материал, ультразвуковое медицинское оборудование.

Methods and means for determining the acoustic characteristics of tissue-mimicking materials

A.A. Gelashvili[1,a], S.I. Kuznetsov[1,b] , G.S. Lukin[1,c]

[1] *FSUE "VNIIFTRI", Mendeleevo 141570, Russia.*

E-mail: [a]gelashvili@vniiftri.ru, [b]sergantex@vniiftri.ru, [c]lukin@vniiftri.ru

Abstract: The problems of ensuring the unity of measurements for materials with acoustic characteristics close to those of biological tissues, as well as anechoic materials, have been considered. These materials are used as part of acoustic measures to monitor the technical condition of ultrasound medical equipment and train specialists. An analysis has been conducted of the applicability of domestic and international standards regulating terms and methods of acoustic measurements to these materials.

Keywords: acoustic measure, ensuring the unity of measurements, tissue-mimicking material, ultrasound medical equipment.

PACS: 43.35.Yb

Введение

Качество диагностики и лечения заболеваний с применением ультразвукового медицинского оборудования (УМО) напрямую связано с соответствием его фактических технических характеристик заявленным. Одним из инструментов проверки характеристик УМО выступают акустические меры, являющиеся средствами измерения. Акустические меры изготавливают из имитирующих ткань материалов (ТИМ, Tissue-mimicking material, ТММ) с акустическими (и в ряде случаев термальными) свойствами подобными тканям человека. В мерах для ультразвуковых сканнеров внутри ТИМ в определенном геометрическом порядке размещают контрольные объекты известного размера с заданными акустическими характеристиками скорости звука и коэффициентов отражения, затухания и рассеивания. Контроль этих характеристик мер необходим на этапах разработки, производства и эксплуатации.

1 Стандарты и их требования

Стандартизация играет ключевую роль в масштабировании технологий и продвижении продукции. При разработке принципиально новых продуктов или технологий важно выпускать новые стандарты либо дополнять существующие, что позволит связать инновации с уже принятыми терминами и решениями для упрощения их внедрения. Разработку международных стандартов, а также технических спецификаций (TS) и отчетов (TR), касающейся ультразвукового медицинского оборудования, его характеристик, требований безопасности и методов измерений, проводит технический комитет «Ультразвук» (ТС 87) Международной Электротехнической Комиссии (МЭК, IEC). Значимая часть этих стандартов издана в качестве ГОСТ [1].

1.1 Термины, определения, методики

По мере разработки стандартов упоминались требуемые характеристики материалов, при этом определения детально не раскрывались или иногда дублировали друг друга, примеры таких определений согласно IEC TS 63081 [2]:

– в IEC 61161 упоминаются «амплитудный коэффициент отражения» и «коэффициент поглощения акустической энергии» для отражающих и поглощающих мишеней, а также «коэффициент пропускания» для пленок, защищающих от акустических течений.

– в IEC 61391–1 упоминается «коэффициент отражения».

– в IEC 61689 определено «снижение отражений» и установлены пределы его значений. Также упоминаются термины «потери на отражение» и «потери на прохождение», и указываются их значения.

– в IEC TS 62306 упоминаются «потери на передачу» и «снижение амплитуды отражения».

– в IEC 62359 определены коэффициенты отражения и поглощения.

– в IEC 60601–2–37 определен «коэффициент акустического поглощения» и упоминается «коэффициент отражения» с требованиями к нему.

В связи с этим была разработана техническая спецификация IEC TS 63081:2019 «Ультразвук — Методы определения ультразвуковых свойств материалов». В ней вводятся следующие термины и определения:

– вносимые потери IL;

– групповая скорость v_g;

– коэффициент обратного рассеяния η;

– коэффициент отражения по амплитуде R_p;

– коэффициент прохождения (пропускания) по амплитуде T_p;

– ослабление эхо-сигнала ER;

– плотность ρ;

– поглощение на единицу длины α;

– скорость продольной волны c_L;

– фазовая скорость v_p.

В [2] представлены методы измерений вносимых потерь IL, скорости продольных волн c_L, поглощения на единицу длины α, ослабления эхо-сигнала ER. Уделено внимание требованиям по подготовке жидких и твердых образцов материалов для проведения измерений. Рассматриваются аспекты применения пары приёмник-передатчик с большой площадью поверхности. Приведен сравнительный обзор методов измерения, основанных на отражении или пропускании акустического сигнала, выделены их достоинства и указаны типовые недостатки в части неопределенности измерений. Ввиду возможной зависимости свойств материалов от температуры и частоты ультразвукового воздействия представлены требования к ультразвуковым преобразователям и методам измерений в зависимости от типа возбуждения, таким как непрерывное и квазинепрерывное излучение, импульсы с частотной модуляцией и спектрометрия с временной задержкой, компенсированная частотная модуляция и импульсные методы.

Разработанные на данный момент стандарты обеспечивают основу для работы, однако в большинстве случаев требуется адаптация кратко изложенных в стандартах методов или применяют нестандартизированные методы измерений.

1.2 Требования к характеристикам ТИМ

Характеристики ТИМ основываются на свойствах мягких тканей человека. Различные характеристики УМО обуславливают различные методы его контроля и требования к характеристикам и их точности для применяемых ТИМ.

Следующие стандарты и технические спецификации IEC устанавливают требования к характеристикам ТИМ (таблица 1, 2) для соответствующих применений:

– IEC 60601-2-5 [3], IEC 60601-2-37 [4] испытания на безопасность температурного воздействия аппаратов для ультразвуковой терапии и ультразвуковой диагностики и мониторинга;

– IEC 61391-1 [5] калибровка систем измерения расстояний в устройствах ультразвуковой диагностики;

– IEC 61391-2 [6] измерение максимальной глубины зондирования и динамического диапазона устройств ультразвуковой диагностики;

– IEC 61685 [7] объекты (меры) испытания потока;

– IEC TS 62306 [8] тест-объекты для оценки повышения температуры в полях приборов ультразвуковой диагностики;

– IEC TS 62558 [9] измерение максимальной глубины зондирования приборов ультразвуковой диагностики;

– IEC TS 62736 [10] акустические меры для контроля качества визуализации УЗИ сканнеров (уровни контроля 2 и 3) в диапазоне частот от 1 до 17 МГц;

– IEC TS 62791 [11] акустические меры для контроля качества шкалы серого УЗИ сканнеров в диапазоне частот от 2 до 15 МГц.

Таблица 1

Технические требования к ТИМ

стандарт или техническая спецификация	теплопро-водность, Вт $м^{-1}$ $К^{-1}$	скорость звука, м $с^{-1}$	затухание
IEC 60601-2-5	0.5 ±0.1	–	2.5 ±1,0 дБ/см
IEC 60601-2-37	0.5 ±0.1	–	2.5 ±1,0 дБ/см на 5 МГц
IEC 61391-1	–	1540 ± 15	0,5 ± 0,05 дБ $см^{-1}$ $МГц^{-1}$ в частотном диапазоне, требуемом для испытаний
IEC 61391-2	–	1540 ± 15 на 3 МГц	0,7 ± 0,05 дБ $см^{-1}$ $МГц^{-1}$ в частотном диапазоне от 1 до 15 МГц
IEC 61685	–	1540 ± 15	$(0,5 \pm 0,05)\cdot 10^{-1}\cdot f$ дБ $м^{-1}$ $Гц^{-1}$, для компактных мер допустимо $(0,75 \pm 0,05)\cdot 10^{-4}\cdot f$ дБ $м^{-1}$ $Гц^{-1}$
IEC TS 62306 кожа	0,34 ± 0,04	1600 ± 200	3,5 ± 0,5 дБ $см^{-1}$ $МГц^{-1}$, на частоте 3,5 МГц
IEC TS 62306 мягкая ткань	0,5 ±0,05	1550 ± 150	0,44 ± 0,04 дБ $см^{-1}$ $МГц^{-1}$, на частоте 3,5 МГц
IEC TS 62306 кость плода	0,5 ±0,05	2100 ± 600	6,0 ± 1,5 дБ $см^{-1}$ $МГц^{-1}$, на частоте 3,5 МГц
IEC TS 62306 кость взр.	0,4 ± 0,5	3200 ± 1600	15 ± 5 дБ $см^{-1}$ $МГц^{-1}$, на частоте 3,5 МГц

IEC TS 62558	–	1540 ± 10 на 3 МГц	0,7 +0,2/-0,05 дБ $см^{-1}$ $МГц^{-1}$ в частотном диапазоне от 1 до 15 МГц
IEC TS 62736 меры уровня 2	–	1540 ± 100 на 3 МГц	от 0,3 до 0,7 дБ $см^{-1}$ $МГц^{-1}$ или 1,4 ± 0,4 дБ $см^{-1}$ $МГц^{-1}$ для компактных мер.
IEC TS 62736 меры уровня 3	–	1540 ± 20 на 3 МГц	0,7 +0,2/-0,05 дБ $см^{-1}$ $МГц^{-1}$
IEC TS 62791	–	1540 ± 10	0,50 ± 0,04 дБ $см^{-1}$ $МГц^{-1}$ для материала сфер с низким эхо-сигналом или 0,70 ± 0,04 дБ $см^{-1}$ $МГц^{-1}$ для фонового ТИМ (окружающего сферы с низким эхо-сигналом), и значение для материала сфер с низким эхо-сигналом должно находиться в пределах 0,04 дБ $см^{-1}$ $МГц^{-1}$ от фонового значения

Таблица 2

Технические требования к ТИМ

стандарт или техническая спецификация	плотность, г $см^{-3}$	коэффициент обратного рассеяния, $см^{-1}$ $ср^{-1}$	акустический импеданс, кг $м^{-2}$ $с^{-1}$	Дополнительные требования
IEC 60601-2-5	–	–	–	удельная теплоемкость 3500 ±500 Дж $кг^{-1}$ $К^{-1}$
IEC 60601-2-37	–	–	–	удельная теплоемкость 3500 ±500 Дж $кг^{-1}$ $К^{-1}$
IEC 61391-1	–	–	–	рассеяние: небольшое, значение не указывают
IEC 61391-2	1,00 ± 0,03	$3 \cdot 10^{-4}$ ± 3 дБ на 3 МГц; с частотной зависимостью в виде f^n, где 2 < n < 4 на частотах от 1 до 15 МГц	–	затухание: так же упоминаются значения 0,5 и 0,84 дБ $см^{-1}$ $МГц^{-1}$ для коммерчески доступных фантомов (мер)
IEC 61685	–	–	$(1,60 \pm ,16) \cdot 10^6$	–
IEC TS 62306 кожа	–	–	$(1,75 \pm 0,25) \cdot 10^6$	Термопроводимость, $(0,09 \pm 0,02) \cdot 10^{-6}$ $м^{-2}$ $с^{-1}$
IEC TS 62306 мягкая ткань	–	–	$(1,55 \pm 0,15) \cdot 10^6$	Термопроводимость, $(0,14 \pm 0,03) \cdot 10^{-6}$ $м^{-2}$ $с^{-1}$
IEC TS 62306 кость плода	–	–	$(3,0 \pm 0,6) \cdot 10^6$	Термопроводимость, $(0,14 \pm 0,03) \cdot 10^{-6}$ $м^{-2}$ $с^{-1}$
IEC TS 62306 кость взр.	–	–	$(6,5 \pm 1,0) \cdot 10^6$	Термопроводимость, $(0,15 \pm 0,03) \cdot 10^{-6}$ $м^{-2}$ $с^{-1}$
IEC TS 62558	1,00 ± 0,11	$3 \cdot 10^{-4}$ ± 10 дБ на 3 МГц с частотной зависимостью в виде f^n, где 2 < n < 4 на частотах от 1 до 15 МГц	–	коэффициент затухания для безэховых включений не менее -60 дБ относительно ТИМ
IEC TS 62736 меры уровня 2	1,00 ± 0,3	$3 \cdot 10^{-4}$ ± 10 дБ на 3 МГц с частотной зависимостью в виде f^n, где $1 \le n \le 4$ на частотах от 1 до 17 МГц	–	требования к характеристикам предъявляются в диапазоне частот от 1 до 17 МГц;
IEC TS 62736 меры уровня 3	1,00 ± 0,11, с стабиль-ностью ± 0,02	$3 \cdot 10^{-4}$ ± 10 дБ на 3 МГц; с частотной зависимостью в виде f^n, где $1 \le n \le 4$ на частотах от 1 до 17 МГц	–	требования к характеристикам предъявляются в диапазоне частот от 1 до 17 МГц
IEC TS 62791	–	$(3 \cdot 10^{-4})$ ± 3 дБ на 3 МГц с частотной зависимостью в виде *(частота)*^{q}, где $3 \le q \le 4$ и для материала включений: сфер с низким уровнем эхо-сигнала — не выше −20 дБ относительно фонового ТИМ материала	–	Требования к стабильности в течении 5 лет: коэффициент обратного рассеяния в пределах ±5 дБ, удельный коэффициент затухания в пределах ±8 %, скорость звука ±1 % и плотность ±2 %

Противоречия в требованиях как правило обусловлены введением новых стандартов,

связанных с улучшением характеристик оборудования, доступного для широкого применения, либо новыми методами контроля, позволяющих охватить большее количество оборудования, в том числе и экспресс-методами.

2. Средства измерения акустических параметров ТИМ

Средств измерений утвержденного типа, как и серийно производимых специализированных средств измерений для измерений акустических параметров ТИМ на данный момент нет. Для обеспечения единства измерений этих параметров могут применяться профильные государственные первичные эталоны единиц величин ГЭТ 169-2025, для величин, связанных с мощностью, давлением и интенсивностью ультразвука в воде и ГЭТ 201-2025, для величин, связанных со скоростью звука в воде.

Исследование характеристик ТИМ можно произвести с применением иммерсионных установок растрового сканирования ультразвукового поля, после доработки их штатного программного обеспечения. Установка состоит из резервуара, системы позиционирования для гидрофона и (или) излучателя, генератора и осциллографа, специального программного обеспечения для управления оборудованием и обработки измерительных данных. Примерами таких установок являются UMS4, AIMS-III, и разрабатываемая в ФГУП «ВНИИФТРИ» СИУП.

Эксплуатируемые сейчас акустические меры длин Gammex имеют нормированную характеристики скорости звука и геометрические параметры включений, которые подтверждаются сравнением с образцовыми мерами акустических длин МАПР и МАДУ. В образцовой мере акустических длин заданное расстояние между отражателями – нейлоновыми или стальными проволоками, обеспечивается их конструкцией и контролируется прямыми геометрическими измерениями. Проволоки натянуты между параллельными стенками емкости (каркаса меры), заполняемой дистиллированной водой или её смесью со спиртом, что обеспечивает требуемую скорость звука. Передачу величины при поверка осуществляют с помощью компаратора – аппарата УЗИ.

Заключение

Измерение характеристик ТИМ в достаточной мере стандартизировано в части терминологии и теоретических основ измерений, однако методы измерений нуждаются в стандартизации. Специализированные средства измерений акустических параметров ТИМ, производимые серийно, на данный момент отсутствуют, что в значительной мере осложняет обеспечение единства измерений в данной области. При разработке ТИМ или изделий с ТИМ следует уделять особое внимание вопросу проведения измерений, чтобы избежать

ситуаций, когда измерение требуемых свойств с метрологической прослеживаемостью невозможно или экономически нецелесообразно.

Список литературы

1. *Еняков, А. М.* Гидроакустические измерения на мегагерцовых частотах. Состояние, проблемы и перспективы развития / А. М. Еняков // Альманах современной метрологии. – 2019. – № 1(17). – С. 159-180. – EDN ZACVZZ.
2. *Еняков, А. М.* Стандарты МЭК в области медицинского ультразвука / А. М. Еняков // Законодательная и прикладная метрология. – 2021. – № 6(174). – С. 33-39. – EDN ZHDEDI.
3. IEC TS 63081:2019. Ultrasonics - Methods for the characterization of the ultrasonic properties of materials. – 2019. – 33 p.
4. IEC 60601-2-5:2009. Medical electrical equipment - Part 2-5: Particular requirements for the basic safety and essential performance of ultrasonic physiotherapy equipment. – 2009. – 66 p.
5. IEC 60601-2-37:2024. Ultrasonics - Methods for the characterization of the ultrasonic properties of materials. – 2024. – 118 p.
6. IEC 61391-1:2006+AMD1:2017 CSV. Ultrasonics - Pulse-echo scanners - Part 1: Techniques for calibrating spatial measurement systems and measurement of point-spread function response. – 2017. – 271 p.
7. IEC 61391-2:2010. Ultrasonics - Pulse-echo scanners - Part 2: Measurement of maximum depth of penetration and local dynamic range. – 2010. – 74 p.
8. IEC 61685:2001. Ultrasonics - Flow measurement systems - Flow test object. – 2001. – 36 p.
9. IEC TS 62306:2006. Ultrasonics - Field characterisation - Test objects for determining temperature elevation in diagnostic ultrasound fields. – 2006. – 75 p.
10. IEC TS 62558:2011. Ultrasonics - Real-time pulse-echo scanners - Phantom with cylindrical, artificial cysts in tissue-mimicking material and method for evaluation and periodic testing of 3D-distributions of void-detectability ratio (VDR). – 2011. – 49 p.
11. IEC TS 62736:2023. Ultrasonics - Pulse-echo scanners - Simple methods for periodic testing to verify stability of an imaging system's elementary performance. – 2023. – 66 p.
12. IEC TS 62791:2022. Ultrasonics - Pulse-echo scanners - Low-echo sphere phantoms and method for performance testing of grey-scale medical ultrasound scanners applicable to a broad range of transducer types. – 2022. – 73 p.

УДК: 616.079 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39658

Разработка долговечного материала для моделирования тканей печени для ультразвуковой эластографии

В.В. Гребенникова[1,a], Д.В. Леонов[1,2,3,b]

[1] *Государственное бюджетное учреждение здравоохранения «Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения г. Москвы», 127051, Россия, г. Москва, ул. Петровка, д. 24, стр. 1;*
[2] *Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, 119333, Россия, г. Москва, ул. Вавилова, д.44, к.2;*
[3] *Научный исследовательский университет «Московский энергетический институт», 111250, Россия, г. Москва, вн.тер.г. муниципальный округ Лефортово, ул. Красноказарменная, д.14, стр.1*
E-mail: [a]grebennikovavv@zdrav.mos.ru, [b]strat89@mail.ru, [b]leonovdv2@zdrav.mos.ru

Аннотация: Эластография сдвиговой волны (эластометрия) является незаменимым методом диагностики диффузных болезней печени, включая неалкогольную жировую болезнь печени. Согласно исследованиям ученых, распространенность болезни выросла с 22.4% до 35.9% за семилетний период среди населения России, в мире ее распространенность около 30% и продолжает расти. Эластометрия нуждается в стандартизации для повышения точности. Для изучения влияния внешних факторов на измерения необходима стабильная модель ткани – долговечный фантом, имитирующий вязкоэластические свойства печени, которые могут быть описаны модулем Юнга. Основной недостаток многих современных эластометрических материалов — их недолговечность, вызванная значительной потерей влаги. Для создания стабильного материала был выбран поливинилхлоридный пластизоль, так как он обладает стабильностью акустических характеристик и низкой склонностью к дегидратации. В настоящей работе предложен рецепт полимерного композита и метод создания фантома на основе пластизоля, эластометрические параметры которого соответствуют диапазону значений печени. Измерения проводились на трех образцах материала при равных условиях; в эксперименте приняли участие четыре современных ультразвуковых сканера: Canon Aplio i800, FujiFilm Arietta 850, Esaote MyLab X8 eXP и Биосс Ангиодин-соно/П. Полученный модуль Юнга находится в диапазоне от 2.2 до 8.5 кПа. В работе рассмотрены преимущества и недостатки материала, а также предложены перспективы улучшения технологии.

Ключевые слова: медицинский фантом, тканеимитирующий материал, сдвиговая волна, эластометрия

Development of a durable material for modeling liver tissues for ultrasound elastography

V.V. Grebennikova[1,a], D.V. Leonov[1,2,3,b]

[1] *Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of the Moscow Health Care Department, 127051, Petrovka st., 24/1, Moscow, Russian Federation;*
[2] *Federal Research Center "Computer Science and Control" of the Russian Academy of Sciences, 119333, Vavilova st., 44/2, Moscow, Russian Federation;*
[3] *National Research University "Moscow Power Engineering Institute", 111250, Lefortovo District, Krasnokazarmennaya st., 14/1, Moscow, Russian Federation*
E-mail: [a]*grebennikovavv@zdrav.mos.ru*, [b]*strat89@mail.ru*, [b]*leonovdv2@zdrav.mos.ru*

Abstract: Shear wave elastography (SWE) is an essential tool for liver diseases diagnostics, including non-alcoholic fatty liver disease (NAFLD). Research indicates that the prevalence of NAFLD has increased from 22.4% to 35.9% over a seven-year period in the Russian population, while global prevalence stands at approximately 30% and continues to rise. SWE requires to be unified to improve diagnostic accuracy. A stable tissue model is necessary to investigate the external factors impact on measurements — researches need a durable phantom that mimics the viscoelastic properties of the liver, which can be described by Young's modulus. The main drawback of many elastometric materials is their lack of durability due to significant moisture loss. Polyvinyl chloride (PVC) plastisol demonstrates stable acoustic characteristics and low dehydration susceptibility, thus plastisol selected to create a stable material. This paper proposes a formula for a polymer and a method for developing a plastisol-based phantom, which elasticity parameters correspond to the range of liver values. Measurements were performed on three material samples under identical conditions using four modern ultrasound scanners: Canon Aplio i800, FujiFilm Arietta 850, Esaote MyLab X8 eXP, and Bioss Angiodyn-Sono/P. The resulting Young's modulus values fall within the range of 2.2 to 8.5 kPa. The study evaluates the advantages and disadvantages of this material and proposes potential improvements to the technology.

Keywords: medical phantom, tissue-mimicking material, shear wave, elastometry
PACS: 43.35.

Введение

Неалкогольная жировая болезнь печени (НАЖБП) является одним из наиболее часто встречающихся диффузных заболеваний печени. Согласно метаанализу открытых данных статистики за 2022 год, ее распространенность в мире составляет 38.8% среди всего населения [1]. В России также наблюдается значительный рост заболеваемости: распространенность болезни в стране выросла с 22.4% до 35.9% за семилетний период с 2015 по 2022 года [2]. Согласно клиническим рекомендациям РФ 2024, при диагностике НАЖБП пациентам рекомендуется проведение ультразвукового исследования (УЗИ) органов брюшной полости для определения эхогенности тканей, а также рекомендовано проведение ультразвуковой эластометрии с целью оценки жесткости тканей и определения фиброза и его стадии, так как он сопутствует НАЖБП примерно в 45% случаев [3].

Фиброз ткани приводит к повышению жесткости и упругости паренхимы печени, потому с помощью модуля Юнга, измеряемого при проведении эластографии и отражающего упругость, можно получить значимую информацию о степени рубцевания ткани и состоянии печени. Модуль упругости Юнга может быть оценен двумя способами. Первый – компрессионная эластография, измерение производится по величине компрессии исследуемого объекта, сжатие материала производится механическим нажатием на объект. Метод подходит для исследования поверхностно расположенных органов или проксимальных участков, но не подходит для дистальной области, так как измерить компрессию на глубине крайне сложно. Второй способ – это эластография сдвиговой волны (ЭСВ). В данном случае волнами сжатия являются акустические волны, излучаемые датчиком. Такие волны распространяются в мягких тканях с высокой скоростью: 1450-1550 м/с (чем жестче ткань, тем выше скорость), поэтому по ним сложно отслеживать разницу в деформации различных тканей [4]. Модуль Юнга в этом случае измеряется по изменению скорости распространения сдвиговой волны – низкочастотной волны, распространяющейся перпендикулярно акустической, которая может быть создана механически, или естественно образующиеся по краям продольной волны.

Метод ЭСВ уже успел зарекомендовать себя в качестве эффективного способа по определению степени фиброза печени без инвазивного вмешательства [3]. Тем не менее, для успешного применения техник ультразвуковой эластографии в диагностике необходимы специалисты, которые знают теорию и обучены работе на УЗ-аппаратах с функцией эластографии, так как результаты метода измерений существенно зависят и от оператора, и от характеристик аппарата. Жесткость реальной печени может значительно изменяться в зависимости от самочувствия пациента в момент измерений – это норма для человека, но

является усложняющим фактором при обучении, а также не позволяет производить настройку оборудования, так как нет точных сведений о жесткости печени пациента. Решение этой проблемы обеспечивают медицинские фантомы – они используются с целью получения первого практического опыта работы в режиме эластографии, а также для обретения уверенности при чтении результатов исследования. Другой важной функцией эластографических фантомов является возможность калибровки оборудования. Отличительная особенность искусственных тканеимитирующих материалов, которая и делает их удобными для обучения и калибровки, – стабильность характеристик во времени.

Материал фантома печени для эластометрии должен обладать модулем Юнга в диапазоне от 3-4 до 18-20 кПа, что соответствует различным степеням фиброза. Самый популярный коммерческий вариант такого фантома выполнен компанией CIRS model 039 в виде четырех контейнеров, наполненных фирменным материалом с различной упругостью: 2.7±5%, 11.5±5%, 24.8±5%, 46.3±5% кПа. Однако, измерения независимыми экспертами данного фантома показали, что абсолютные значения упругости фантома могут отличаться на 25-35% от заявленных производителем, тем не менее, фантом надежно обеспечивает стабильность измерений [6].

Некоммерческие рецепты эластометрических фантомов преимущественно выполнены из желатина, акриламида и агар-агара – смесей, в основе которых вода, что предполагает быструю деградацию материала и изменение его свойств в следствии пересыхания [7,8]. Идея настоящей разработки фантома печени заключается в создании нескольких образцов тканеимитирующего материала с эластометрическими характеристиками, соответствующими здоровой печени и различным степеням фиброза.

1 Материалы и методы

В качестве основы для эластометрического фантома печени был выбран поливинилхлорид (ПВХ) пластизоль, так как он успел зарекомендовать себя как тканеимитирующий материал с акустическими характеристиками близкими к реальным тканям [9,10]. Готовый композит ПВХ, который применяется для создания фантомов в исследовании [9], был измерен с помощью УЗ-сканера FujiFilm Arietta 850 в режиме эластометрии. Результаты измерений двух образцов показали, что во всех экземплярах показатели упругости не соответствовали здоровой печени, так как их модуль Юнга был в среднем следующим: 17 кПа для первого; 33 кПа для второго.

Для решения первой проблемы – высокого модуля Юнга в материале – предлагается добавить к составу касторовое масло, так как оно является пластификатором для ПВХ, сочетается со фталатными пластификаторами и доказано снижает упругость [8]. Вторая проблема материала – сложность воспроизведения характеристик, так как в готовом

композите нет возможности контролировать точность отношения количества ингредиентов – оно может быть разным даже в одной партии материала от одного производителя. В связи с этой трудностью было решено самостоятельно замешивать базовый состав из ПВХ-порошка и пластификатора: за основу был выбран рецепт из патента [11]. После анализа литературы в качестве пластификатора был выбран диизононилфталат (ДИНФ) – фталатный пластификатор, который используется для производства медицинских товаров. В качестве материала для впитывания и удержания излишек масла при пресыщении раствора был выбран кукурузный крахмал – недорогой и нетоксичный порошок, который хорошо вмешивается в раствор, а также дает эхогенность при серошкальном исследовании.

Изначально в термостойкой посуде подготавливают базовую смесь из двух ингредиентов: ПВХ-порошка и пластификотора в указанном отношении до полного растворения комочков, масса готовой смеси принимается за 100%. После к раствору добавляют касторовое масло и крахмал, доля которых считается уже от готовой базовой смеси по массе. Полученный композит тщательно перемещивают с помощью электронной мешалки и помещают в микроволновую печь для быстрого нагревания. Нагревать смесь следует короткими импульсами постоянно перемешивая для обеспечения однородной пластификации материала, температуру материала постоянно контролируют с помощью термометра. При достижении 155-160°C, когда ПВХ-порошок полностью растворяется, жидкую смесь дегазируют в специальной вакуумной камере. Готовый материал разливают в формы фантома и, непрерывно помешивают до момента, когда материал начинает загустевать, после фантом оставляют при комнатной температуре для полного остывания.

Точные составы трех образцов из разработанного пластизоля приведены в таблице 1. Состав образцов 1 и 2 идентичен, но отличается только датой создания. Это было сделано с целью отследить изменения характеристик материала после полной стабилизации. Размеры всех образцов: 110x70x100 мм.

Таблица 1

Рецепты ПВХ пластизоля

Образец	Дата производства	Доля ПВХ, %	Доля ДИНФ, %	Доля касторового масла, %	Доля крахмала, %
Фантом 1	31.07.2025	9	91	+30	+5
Фантом 2	10.12.2025	9	91	+30	+5
Фантом 3	06.08.2025	8	92	+30	+8

Измерения производились в режиме двумерной эластографии на четырех УЗ-сканнерах: Canon Aplio i800, FujiFilm Arietta 850, Esaote MyLab X8 eXP и Биосс Ангиодин-соно/П. Измерения производились в один день (12.12.2025) и условия проведения эксперимента были одинаковыми для всех аппаратов: датчик был зафиксирован с помощью

штатива для исключения фактора влияния нажима рукой, между фантомом и датчиком была гелевая подушка толщиной около 2 см; область измерения – центр фантома, центр рамки при двухмерном измерении находился на глубине ровно 50 мм. Каждое полученное значение упругости является усредненным значением десяти измерений с учетом отсеивания выбросов.

2 Результаты и обсуждение

Результаты измерений трех образцов пластизоля и точные параметры аппаратов отражены в таблице 2. На рис. 1 приведен отчет по измерениям всех образцов на сканере FujiFilm.

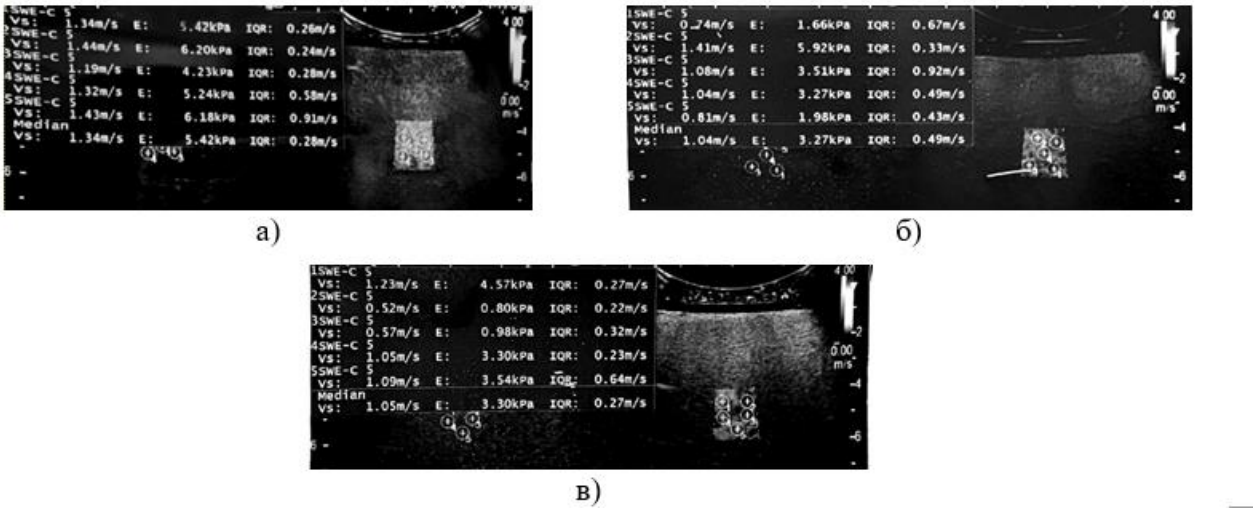


Рисунок 1 – Измерение скорости сдвиговой волны на аппарате FujiFilm Arietta 850: а - измерения фантома 1; б – измерения фантома 2; в – измерения фантома 3

Таблица 2

Параметры датчиков и результаты измерения

Аппарат	Центральная частота, МГц	Рабочая частота, МГц	Шкала измерения	Модуль Юнга в фантоме, кПа		
				1	2	3
Canon Aplio i800	7.0	5.5	40 кПа	8.5	7.2	6.5
FujiFilm Arietta 850	3.0	3.3	5.9 м/с	5.3	3.0	3.0
Esaote MyLab X8 eXP	1.8	5.6	0-3.9 м/с	4.3	2.2-2.4	2.5
Биосс Ангиодин-соно/П	1.6	2.5	60 кПа	5.3	5.7-5.8	4.0

Полученные значения модуля Юнга для всех образцов существенно различаются при измерении на разных аппаратах, что предположительно связано с индивидуальными особенностями обработки сигнала аппаратов разных фирм: к каждому сканеру производитель предоставляет таблицу пороговых значений для определения степени фиброза печени.

При подготовке материала основная сложность возникает на этапе нагревания смеси до высоких температур: крахмал в составе горячей жидкой смеси начинает вариться с

образованием пены, потому может потребоваться проведение нескольких циклов дегазации с промежуточным подогреванием материала. Для решения этой проблемы следует попробовать заменить крахмал на другой материал, хорошо поглощающий масло, например, карбонат кальция.

Во время проведения эксперимента по измерению возникла сложность со стандартизацией методики постановки датчика, так как малейший нажим на фантом существенно влиял на результаты измерений, даже с учетом использованием штатива, что связано с очень нежной текстурой фантома. Эту проблему теоретически следует решить, разработав для фантома внешний каркас из плотного пластизоля, который позволит улучшить амортизацию нажима.

Заключение

Метод ультразвуковой эластографии зарекомендовал себя как надежный неинвазивный диагностический метод определения фиброза печени, который зачастую возникает на фоне стеатоза, в частности при НАЖБП. Диагностика фиброза при НАЖБП является обязательным этапом при разработке плана лечения. Согласно анализу доступных рецептов эластометрических фантомов – основным компонентом состава большинства является вода, что делает изделия недолговечными из-за деградации материала, связанного с испарением воды. В настоящей работе предлагается решить проблему выбором ПВХ пластизоля в качестве основного компонента, так как пластификаторы в его составе испаряются значительно медленнее воды. Мягкий пластизоль уже успел зарекомендовать себя в качестве хорошего тканеимитирующего материала для УЗИ. Самым существенным недостатком ПВХ пластизоля при эластометрическом исследовании является слишком высокий модуль Юнга в материале из готового композита. Проблему удалось решить с помощью разработки собственного рецепта пластизроля, который предусматривает добавление в смесь ингредиентов для снижения упругости. В настоящей работе предложены два рецепта фантома из ПВХ-порошка, пластификатора ДИНФ, касторового масла и крахмала. В исследовании были изучены три прототипа эластометрического фантома, которые соответствуют по упругости нормальной печени. В результате измерений были доказаны следующие гипотезы, возникшие на этапе разработки нового рецепта пластизоля:

- предложенный в работе рецепт позволяет создавать фантомы, имитирующие различные степени фиброза по шкале METAVIR;
- упругость материала можно изменять с помощью добавления касторового масла, а также уменьшая или увеличивая доли пластификатора;
- создание материала по рецепту увеличивает воспроизводимость копий фантома;
- свойства недавно изготовленного фантома отличаются от полностью стабилизированной модели.

Список литературы

1. *Chan K.E., Koh T.J.L., Tang A.S.P., Quek J., Yong J.N., Tay P., Tan D.J.H., Lim W.H., Lin S.Y., Haung D. et al.* Global Prevalence and Clinical Characteristics of Metabolic-associated Fatty Liver Disease: A Meta-Analysis and Systematic Review of 10 739 607 Individuals. // J Clin Endocrinol Metab. 2022. **107** (9), PP. 2691–2700.
2. *Андреев Д. Н., Маев И. В. и Кучерявый Ю. А.* Распространенность неалкогольной жировой болезни печени в России: метаанализ // Consilium Medicum, 2023. **25**, № 5. С. 312-318.
3. *Villani R., Lupo P., Sangineto M., Romano A.D., Serviddio G.* Liver Ultrasound Elastography in Non-Alcoholic Fatty Liver Disease: A State-of-the-Art Summary. // Diagnostics (Basel). 2023. **13** (7). P. 1236.
4. *Изранов В. А., Казанцева Н. В., Мартинович М. В., Бут-Гусаим В. И., Степанян И. А.* Физические основы эластографии печени // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Естественные и медицинские науки. 2019. №2.
5. *Gennisson J.L., Deffieux T., Fink M., Tanter M.*. Ultrasound elastography: principles and techniques. // Diagn Interv Imaging. 2013. **94** (5), PP. 487-95.
6. *Mulabecirovic A., Mjelle A.B., Gilja O.H., Vesterhus M., Havre R.F.*. In vitro quantification of tissue elasticity: S-Shearwave Elastography // SonoAce Ultrasound. 2017. №32
7. *Bhatt M., Moussu M.A.C., Chayer B., Destrempes F., Gesnik M., Allard L., Tang A., Cloutier G.* Reconstruction of Viscosity Maps in Ultrasound Shear Wave Elastography. // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2019. **66**. N6, PP. 1065-1078.
8. *Nguyen M. M., Zhou S., Robert J. L., Shamdasani V. and Xie H.* Development of oil-in-gelatin phantoms for viscoelasticity measurement in ultrasound shear wave elastography //Ultrasound in medicine & biology. 2014. **40**. N 1. PP. 168-176.
9. *Leonov D., Venidiktova D., Costa-Júnior J.F.S., Nasibullina A., Tarasova O., Pashinceva K., Vetsheva N., Bulgakova J., Kulberg N., Borsukov. A et al*. Development of an anatomical breast phantom from polyvinyl chloride plastisol with lesions of various shape, elasticity and echogenicity for teaching ultrasound examination //International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery. 2024. **19**. N 1. PP. 151-161.
10. *de Carvalho I.M., De Matheo L.L., Costa Júnior J.F.S., Borba C.M., von Krüger M.A., Infantosi A.F., Pereira W.C.*. Polyvinyl chloride plastisol breast phantoms for ultrasound imaging. Ultrasonics. 2016. **70**. N 98, PP. 106.
11. Патент РФ 2184507. Экзопротез молочной железы / *Махортов Н.С.*. Заявл. 18.08.2000. Опубл. 10.07.2002.

УДК: 534-8, 534.08 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39659

АКУСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ НЕИНВАЗИВНОГО АНАЛИЗА ОБЪЕМНЫХ ТКАНЕИНЖЕНЕРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ IN VITRO

Храмцова Е.А.[1)], Петронюк Ю.С.[1,2)], Антипова К.Г.[3)], Шариков Р.В.[3)], Богаченков А.Н.[1)], Малахов С.Н.[3)], Бедник Д.Ю.[4)], Дмитряков П.В.[3)], Григорьев Т.Е.[3,5)]

[1)] Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт биохимической физики имени Н.М. Эмануэля Российской академии наук, Москва;

[2)] Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук, Москва;

[3)] НИЦ «Курчатовский институт», Москва;

[4)] Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», Долгопрудный

[5)] Российский технологический университет, Институт тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова, Москва

Тел.: +7(499)137-8347; E-mail: alyonushk@gmail.com

Расширяющееся применение в регенеративной медицине 3D матриксов со сложной топографией поверхности и объемной микроструктурой требует разработки новых методов для визуализации и анализа изменяющихся упругих свойств тканеинженерных конструкций (ТИК) в процессе их созревания. В данной работе метод сканирующей импульсной акустической микроскопии (СИАМ) был применён для неинвазивного исследования нетканых матриксов на основе поли(L-молочной кислоты) (ПЛЛА) и их композитов с хитозаном. С помощью данного метода определялись скорость распространения звука, интегральное затухание и спектральные характеристики образцов ТИК. Результаты акустической микроскопии были сопоставлены с данными механических испытаний на растяжение, гель-проникающей хроматографии, дифференциальной сканирующей калориметрии, сканирующей электронной микроскопии. Данные о развитии клеточной составляющей получали с помощью витального теста CCK-8. Результаты демонстрируют, что СИАМ обладает высокой чувствительностью к изменениям состава ТИК, включая наличие функционализирующих добавок, инкорпорированных клеток, а также последующих процессов клеточной пролиферации и синтеза внеклеточного матрикса. Метод также эффективно детектирует изменения геометрии образцов. Таким образом, методология

СИАМ может быть рекомендована в качестве эффективного неразрушающего инструмента для комплексного мониторинга ТИК на протяжении всего периода их *in vitro* созревания.

Ключевые слова: акустическая микроскопия, нетканые матриксы, композиты, тканеинженерные конструкции, регенеративная медицина

PACS: 43.35.Yb, 87.80.Rb

Введение

В регенеративной медицине лидирующее направление — изготовление объёмных матриксов и тканеинженерных конструкций (ТИК), что отражает переход от 2D систем к 3D, воспроизводящим нативную среду обитания клеток. Культивирование на 2D-поверхностях не является физиологичным для многих типов клеток (например, фибробластов) и не поддерживает их дифференцированное состояние [1]. 3D матриксы должны обладать биосовместимостью, нетоксичностью, биодеградируемостью и соответствием механических свойств нативной ткани. Для большинства мягких тканей оптимальными являются рыхлые высокопористые структуры (нетканые и губчатые матриксы), способствующие лучшей адгезии и пролиферации клеток.

ПЛЛА — перспективный биоразлагаемый полимер для ТИК, однако его гидрофобность и низкая адгезия клеток требуют модификации, например, хитозаном, который улучшает смачиваемость, но быстро деградирует. Сшивка модификатора позволяет регулировать упруго-механические свойства композита.

Несмотря на потребность в 3D ТИК, ограничено число методов, способных дать количественные данные и объёмную визуализацию таких структур. Матриксы оптически непрозрачны, а флуоресцентная и конфокальная микроскопия обеспечивают видимость лишь на глубину до 500 мкм, что недостаточно для объёмных образцов. Перспективным методом является сканирующая импульсная акустическая микроскопия (СИАМ), позволяющая изучать внутреннюю микроструктуру в условиях, близких к естественным.

В нашей работе СИАМ применена для оценки упругих свойств нетканого матрикса из полилактида (НМ) и композитного нетканого матрикса с хитозаном (НМх) в исходном состоянии и в процессе инкубации с клетками. Результаты создают базу для применения нетканых матриксов при формировании многокомпонентных ТИК с механическими свойствами, изменяющимися по мере созревания.

1 Материалы и методы

НМ из ПЛЛА изготавливали методом электроспиннинга 9%-ного раствора полимера в смеси хлороформ/этанол (90:10) при напряжении 19 ± 1 кВ и расстоянии до коллектора 30 см, с использованием двухкапиллярной системы и вращающегося барабанного коллектора (30–60 об/мин). После формования образцы подвергали вакуумной сушке (1 мбар, 24 ч, комнатная температура) для удаления остаточного растворителя. Готовые НМ модифицировали 0,5%-ным раствором хитозана (600 кДа, степень деацетилирования 60%) с последующей лиофилизацией и сшивкой в парах глутарового альдегида, при этом содержание хитозана в НМх составило 7,9 ± 2,6% по данным гравиметрического анализа [2]. Молекулярно-массовые характеристики образцов определяли методом ГПХ на системе Knauer с колонками Agilent PLgel Mixed-C в ТГФ при 40 °C и калибровке по полистирольным стандартам (162–1290 кДа). Термофизические свойства образцов исследовали на дифференциальном сканирующем калориметре PerkinElmer DSC8500 в диапазоне 0–220 °C со скоростью нагрева 20 °C/мин в атмосфере азота. Механические свойства матриксов оценивали методом одноосного растяжения (Instron 5965, 25 мм/мин) с определением модуля Юнга, предела прочности и удлинения при разрыве, статистический анализ проводили с использованием двухфакторного ANOVA анализа с post hoc тестом Тьюки ($p < 0,05$, $n = 5$). Изображения, полученные с помощью сканирующей электронной микроскопии Phenom XL (Thermo Scientific, США) использовались для характеризации НМ и НМх (распределение диаметров волокон, плотность упаковки, удельная поверхность).

Для изготовления ТИК из НМ и НМх вырезали образцы стандартизированных размеров (5×7 мм), стерилизовали γ-облучением (15 кГр, 60 °C) и засевали первичными дермальными фибробластами крыс (35 000 клеток на образец). Пролиферацию клеток оценивали с помощью анализа CCK-8 на 3, 10 и 17 дни при обновлении полной культуральной среды (ДМЕМ) каждые 48 часов. Дополнительно образцы матриксов обоих типов без клеток инкубировали в ДМЕМ в тех же условиях, что и ТИК, для оценки кинетики гидролитической деградации на 0 и 4 неделе.

Ультразвуковые исследования проводили на сканирующем импульсном акустическом микроскопе SIAM-2017, разработанном в Институт биохимической физики имени Н.М. Эмануэля РАН. Для визуализации использовали линзу 50 МГц с апертурой 30° (C-сканирование приповерхностных областей и B/D-сканирование объема, латеральное разрешение 36 ± 18 мкм). Количественные измерения выполняли линзой 50 МГц с апертурой 11,2° в среде ДМЕМ (диаметр перетяжки 135 мкм, фокус 4,5 мм), регистрируя сигналы в диапазоне 10–70 МГц с длительностью импульса 20 нс и частотой оцифровки 500 МГц при

напряжении 20 В. Скорость звука, интегральное затухание и спектральные параметры определялись по стандартным формулам [3, 4].

2 Результаты и обсуждение

Акустическая микроскопия в среде ДМЕМ показала эффективную толщину образцов: 890 ± 26 мкм для НМ и 1420 ± 23 мкм для композита НМх. Композит набухал в высоту с небольшим сокращением по длине и ширине (≤10%) (рис. 1). После посева клеток толщина обоих типов матриксов увеличилась на 30 мкм, затем по мере культивирования у НМ уменьшилась на 274 мкм, а у композита НМх — на 89 мкм.

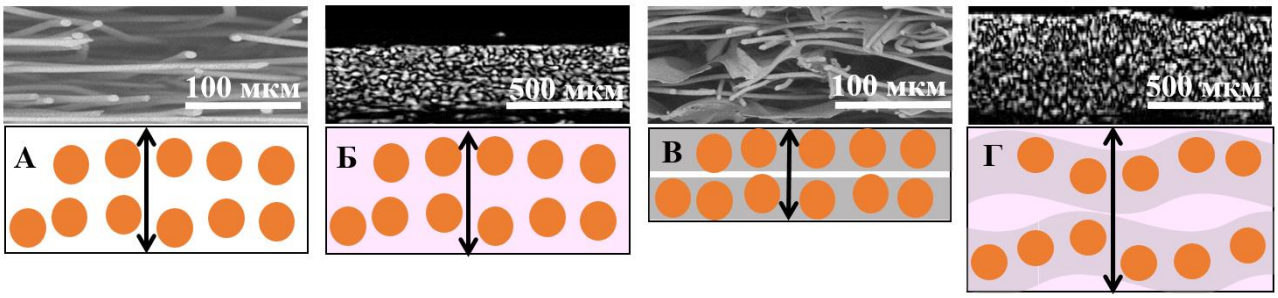


Рисунок 1. Визуализация матриксов и их схематическое изображение до и после модификации и пропитки культуральной средой ДМЕМ: А – электронная микроскопия НМ в сухом состоянии; В – электронная микроскопия НМх в сухом состоянии; Б – ультразвуковая визуализация НМ в набухшем состоянии; Г - ультразвуковая визуализация НМх в набухшем состоянии.

Скорость звука оказалась чувствительнее акустической визуализации к модификации и клеточной инфильтрации. Благодаря высокой пористости (92,5%) скорость звука в НМ (1521 м/с) была близка к скорости ДМЕМ (1509 м/с). Композит НМх показал более высокую скорость звука (1524 м/с), коррелирующую с его модулем Юнга. После посева клеток на 3-й день скорость звука в обоих типах матриксов увеличилась на 4,5 м/с (таблица 1). К 17-му дню в композите НМх скорость звука снизилась до 1521 м/с одновременно с уменьшением толщины. До посева клеток интегральное затухание было выше у НМ (1,72 дБ/мм), чем у композита НМх (1,2 дБ/мм). После посева значения сблизились до ~1,1 дБ/мм. К 17-му дню интегральное затухание в НМ выросло до 1,84 дБ/мм, а в композите НМх сначала резко увеличиось до 1,64 дБ/мм (10-й день), затем снизилось до 1,28 дБ/мм. Наклон частотной зависимости затухания положительно коррелировал с интегральным затуханием: у НМ наклон был круче. После посева клеток наклон для НМ увеличился, а для композита НМх существенно не изменился. При созревании наклон для НМ продолжал расти, тогда как у композита НМх он резко возрастал к 10-му дню с последующим снижением.

После посева клеток на 3 сутки ССК-8 показал равное количество жизнеспособных клеток на обоих типах матриксов. Прямая визуализация клеток акустической микроскопией была невозможна из-за сходства их акустического импеданса со средой ДМЕМ. Однако

зафиксировано увеличение толщины обоих матриксов на ~30 мкм и рост скорости звука на ~4 м/с, подтверждающие присутствие клеток. Для НМ отмечено снижение интегрального затухания из-за сглаживания поверхности клетками, тогда как у композита интегральное затухание изменилось минимально, так как поры частично уже были закрыты хитозаном, одновременно ограничивающим миграцию клеток.

Таблица 1

Основные ультразвуковые характеристики ТИК

Срок формирования ТИК		**3 день**	**10 день**	**17 день**
Скорость звука, м/с	НМ	1525	1527	1528
	НМх	1529	1524	1521
Интегральное затухание, дБ/мм	НМ	1,14	1,44	1,84
	НМх	1,08	1,64	1,28
Наклон частотной зависимости, дБ/мм/МГц	НМ	0,13	0,14	0,19
	НМх	0,13	0,16	0,14

На 10 день формирования ТИК ССК-8 выявил значительное расхождение в росте клеточной массы: пролиферация на композите НМх ниже. Это связано с уменьшенной пористостью композита и его иной механической микросредой, способствующей 2D-росту. Толщина НМ уменьшилась (миграция клеток в объём, синтез внеклеточного матрикса (ВКМ)), а скорость звука увеличилась (рост плотности ТИК). В НМх толщина вернулась к исходному уровню с большим разбросом значений, а скорость звука снизилась, что указывает на начальную деградацию хитозана. Интегральное затухание и наклон частотной зависимости выросли в обоих типах, но в НМх — резче, коррелируя с деградацией хитозана.

На 17 день после посева клеток рост клеточной массы на НМх оставался ниже, но активная пролиферация сохранялась за счёт появления новых путей миграции по мере разрушения хитозана. Толщина обоих типов матриксов продолжала уменьшаться, хотя у НМх — в меньшей степени (остаточный хитозан обеспечивал механическую поддержку). Скорость звука в НМ увеличилась (уплотнение ТИК), а в НМх снизилась. Интегральное затухание в НМ продолжало расти (созревание ВКМ), тогда как в НМх уменьшилось из-за деградации хитозана и ремоделирования ВКМ. Наклон частотной зависимости в НМх

снизился, отражая динамическую перестройку ВКМ, тогда как в НМ изменения были более плавными.

3 Заключение

В работе показано, что СИАМ высокочувствителен к динамике состава нетканых матриксов со сложной топографией поверхности в ходе созревания ТИК. Метод позволяет неинвазивно оценивать пространственные изменения упругих свойств и геометрии образцов в стандартных условиях культивирования *in vitro*. Интегральное затухание и наклон частотной зависимости спектра выявили различия в доминирующих механизмах рассеяния ультразвука, которые коррелировали с конкретными стадиями формирования ТИК. Сочетание количественной ультразвуковой характеризации с ССК-8 даёт эффективный инструмент для оценки всех этапов созревания ТИК. Оба метода нетоксичны и неинвазивны, что позволяет последовательно анализировать одни и те же образцы с течением времени без нарушения стерильности. Если ССК-8 количественно измеряет пролиферацию клеток, то акустические методы чувствительнее к изменениям микроархитектуры матрикса и его упругости, включая отложение собственного ВКМ. В совокупности эти результаты являются важным шагом к созданию надёжной системы неразрушающего контроля *in vitro* для платформ тканевой инженерии и регенеративной медицины.

Ультразвуковые исследования, изготовление ТИК и ССК-8 тесты проведены в рамках выполнения государственного задания №122041400112-8. Изготовление матриксов, исследование их физико-механических и физико-химических свойств проведены в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

Список литературы

1. *Baker B.M., Chen, C.S.* Deconstructing the third dimension: How 3D culture microenvironments alter cellular cues. // J. Cell Sci. 2012, **125**, P. 3015.
2. *Lukanina K.I., Grigoriev T.E., Krasheninnikov S.V., Mamagulashvilli V.G., Kamyshinsky R.A., Chvalun, S.N.* Multi-hierarchical tissue-engineering ECM-like scaffolds based on cellulose acetate with collagen and chitosan fillers. // Carbohydr. Polym. 2018, **191**, P. 119–126.
3. *Sorriento A., Poliziani A., Cafarelli A., Valenza G., Ricotti L.* A novel quantitative and reference-free ultrasound analysis to discriminate different concentrations of bone mineral content. // Sci. Rep. 2021, **11**, P. 301.
4. *Taggart L.R., Baddour R.E., Giles A., Czarnota G.J., Kolios M.C.* Ultrasonic characterization of whole cells and isolated nuclei. // Ultrasound Med. Biol. 2007, **33**, P. 389.

УДК: 534.7 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39660

Исследование релаксационных характеристик цельной крови человека для разработки новых акустических методов в лабораторной медицинской диагностике

А.В. Клемина[1,a], С.Н. Гурбатов[1,b] В.А. Клемин[2,c]

[1] *ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» (ННГУ). 603022, Нижний Новгород, проспект Гагарина 23*

[2] *ООО «фирма «БИОМ». 603134, Нижний Новгород, ул. Костина, д.2, офис 90*

E-mail: [a]annet17@yandex.ru, [b]gurb@rf.unn.ru, [c]viktorklemin@mail.ru

Аннотация: Более двух десятилетий уникальный, не имеющий аналогов ни в России, ни за рубежом акустический анализатор АКБа-01 БИОМ успешно используется в 250 лабораториях России для определения без реагентов компонентов липидного профиля, общий белок и белковые фракции сыворотки крови человека. Использование акустического анализатора для характеризации эритроцитов крови человека было ограничено. В статье представлен обзор возможностей использования акустической камеры объемом 130 – 150 мкл для всесторонних исследований эритроцитов, как в суспензиях, так и в цельной крови человека. Представлены результаты и обсуждаются перспективы применения результатов этих исследований для безреагентных лабораторных методик в диагностических целях при обследовании пациентов в лечебных учреждениях России.

Ключевые слова: ультразвук, акустический анализатор, цельная кровь, эритроциты, лабораторная диагностика.

Study of relaxation characteristics of human whole blood for the development of new acoustic methods in laboratory medical diagnostics

A.V. Klemina[1,a], S.N. Gurbatov[1,b] V.A. Klemin[2,c]

[1] *National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod. 603022, Nizhny Novgorod, Gagarin Ave., 23*

[2] *BIOM LLC. 603134, Nizhny Novgorod, Kostina St., Building 2, Office 90*

E-mail: [a]annet17@yandex.ru, [b]gurb@rf.unn.ru, [c]viktorklemin@mail.ru

Abstract: For over two decades, the unique AKBa-01 BIOM acoustic analyzer, unparalleled in Russia or abroad, has been successfully used in 250 Russian laboratories to determine lipid profile components, total protein, and protein fractions in human serum without the use of reagents. The use of this acoustic analyzer for characterizing human red blood cells has been limited. This article

presents an overview of the capabilities of a 130–150 μL acoustic chamber for comprehensive red blood cell analysis, both in suspensions and in whole human blood. The results are presented and the potential application of these studies to reagent-free laboratory methods for diagnostic purposes in patient examinations in Russian healthcare facilities is discussed.

Keywords: ultrasound, acoustic analyzer, whole blood, red blood cells, laboratory diagnostics.

PACS: 43.35.Yb

Введение

В настоящее время исследование акустических характеристик крови человека является одним из важных направлений медицинской акустики. Результаты таких исследований позволят разработать новые методы лабораторного наблюдения за эффективностью лечения сердечно-сосудистых заболеваний, сахарного диабета и т.п. В частности, для подобных исследований можно использовать акустический безреагентный анализатор «БИОМ», который позволяет измерять акустические параметры крови, а также различных растворов.

Однако механизм поглощения ультразвука в эритроцитах крови исследован недостаточно. Известно классическое поглощение ультразвука в жидкостях, связанное с вязкостью, и релаксационное, возникающее при изменении давления и плотности жидкости в результате колебаний в ультразвуковой волне. Именно релаксационное поглощение связано со структурой белковых макромолекул в цельной. Исследование частотных зависимостей поглощения в цельной крови может помочь в разработке новых безреагентных методов лабораторной диагностики.

1 Механизмы поглощения ультразвука в жидкости

При исследовании механизмов поглощения ультразвука в жидкостях можно выделить 2 различных процесса.

1. Классический механизм

Этот механизм связан с тем, что звуковые волны вызывают колебания молекул жидкости, которые в свою очередь взаимодействуют друг с другом из-за вязкости жидкости. Это приводит к преобразованию энергии звуковой волны в тепловую энергию за счет трения между молекулами. Чем выше вязкость жидкости, тем больше энергии поглощается, что приводит к уменьшению интенсивности звука. Поглощение звука в этом случае пропорционально квадрату частоты звука и вязкости жидкости. Классический механизм поглощения звука характерен для низких частот и вязких жидкостей

Формула для коэффициента поглощения α согласно Стоксу [1]:

$$\alpha = \frac{8}{3}\frac{\pi^2 f^2 \eta}{c^3 \rho},$$

где f - частота, c - скорость звука в жидкости, η - вязкость жидкости, ρ - плотность жидкости. То есть поглощение пропорционально квадрату частоты.

2. Релаксационный механизм

Этот механизм связан с изменением давления и плотности жидкости в результате колебаний звуковой волны. Поглощение звука в этом случае зависит от скорости релаксации давления в жидкости и времени релаксации. Когда звуковая волна проходит через жидкость, молекулы начинают совершать колебательные движения, изменяя давление и плотность в жидкости. Время релаксации характеризует, как быстро давление в жидкости может восстановить равновесие после воздействия звуковой волны. Чем меньше время релаксации, тем быстрее жидкость способна поглотить энергию звука [1].

Релаксационный механизм поглощения звука чаще проявляется при высоких частотах и низких вязкостях жидкостей.

При анализе экспериментально полученных зависимостей поглощения от частоты необходимо учитывать целый ряд релаксационных процессов, вклад которых суммируется и добавляется к так называемому коэффициенту классического поглощения, вычисленному Стоксом и Кирхгофом. Этот результат записывается в виде выражения [2]:

$$\frac{\alpha}{f^2} = \alpha_{\text{классич}} + \sum_j \frac{A_j}{1 + \left(\frac{f}{f_{Rj}}\right)^2},$$

где $\alpha_{\text{классич}}$ - коэффициент классического поглощения, f_{Rj} – температурно-зависимые частоты релаксации, связанные с исследуемыми составляющими раствора. Значения A_j зависят от температуры и гидростатического давления.

Зависимость α/f^2, характерная для этих двух механизмов поглощения, приведена на графике ниже (рис. 1). Можно заметить, что для классического механизма зависимость фактически отсутствует, т.е. значение поглощения не изменяется с ростом частоты. Зависимость, представленная для релаксационного механизма, является суммой классического и релаксационного. Можно заметить, что без классического вклада она спадает до нуля при больших значениях частоты.

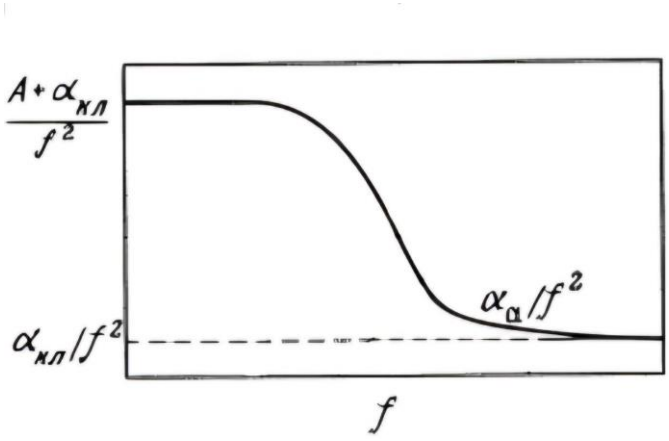


Рис. 1. Классический и релаксационный механизм поглощения.

В целом, каждый из этих механизмов описывает, как различные факторы влияют на потерю энергии звуковыми волнами при их прохождении через жидкость, приводя к уменьшению амплитуды волны и, следовательно, к её поглощению.

2 Экспериментальная часть

2.1 Частотные зависимости поглощения ультразвука в растворах солей

Для контроля правильности оценки вклада в суммарное поглощение ультразвука релаксационного механизма нами выбраны водные растворы солей, имеющие, как только классическое поглощение, так и классическое и релаксационное поглощение.

Для исследования были приготовлены водные растворы $NaHCO_3$, $NaCl$ и $MnSO_4$ с заранее заданными величинами концентраций, соответствующих скорости ультразвука в цельной крови. Измерение частотных зависимостей поглощения на длину волны проводились в частотном диапазоне 1 - 8.5 МГц на акустическом анализаторе АКБа-01 БИОМ. Точность поддержания температуры в акустических ячейках ± 0.005 °С. На основе проведенных исследований была определена точность измерений поглощения на длину волны ультразвука в указанном выше диапазоне частот, которая составила ± 10^{-3} %. Время выполнения сканирования частоты для измерений поглощения ультразвука в диапазоне 1 - 8.5 МГц в растворах солей составляло 1 мин. 42 сек.

На рис. 2 представлена частотная зависимость поглощения на длину волны ультразвука в водном растворе $MnSO_4$ концентрацией 1.7 ммол/л.

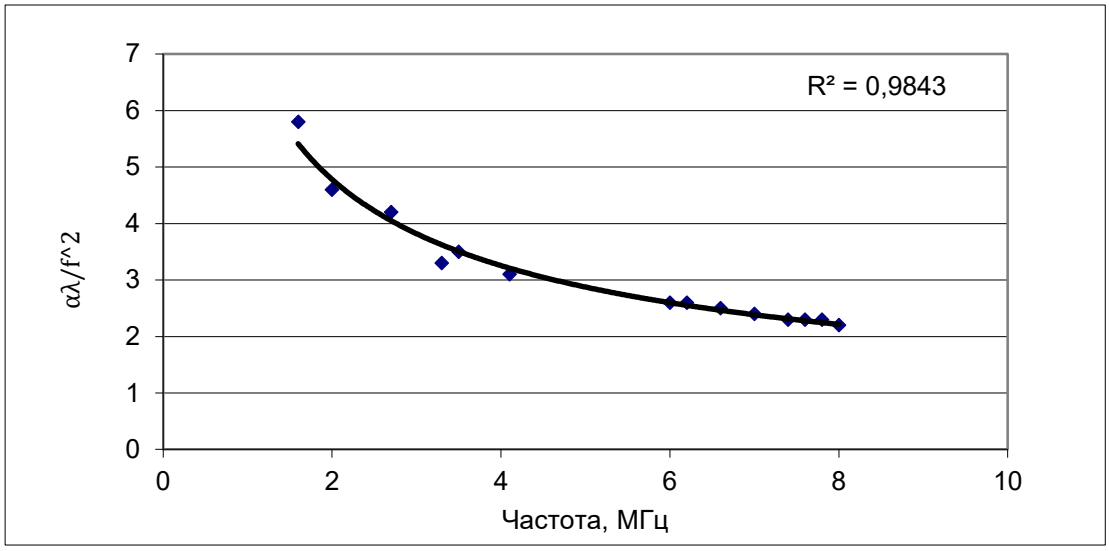


рис. 2. Частотная зависимость $\alpha\lambda/f^2$ ультразвука в водном растворе $MnSO_4$.

2.2 Частотные зависимости поглощения ультразвука в цельной крови

Для получения данных по частотным зависимостям поглощения на длину волны ультразвука в цельной крови в диапазоне 1 - 8.5 МГц на акустическом анализаторе БИОМ использовалась цельная кровь пациентов Нижегородского клинического диагностического центра, взятая натощак из локтевой вены в пробирку с К3 ЭДТА.

Пример измеренной зависимости поглощения ультразвука от частоты в цельной крови представлен на рис. 3.

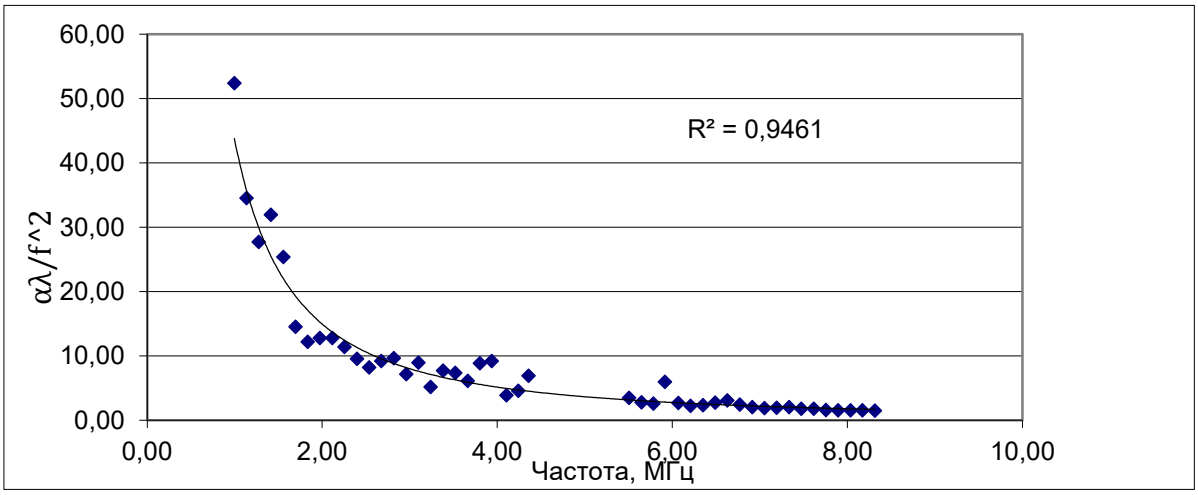


Рис. 3. Частотная зависимость $\alpha\lambda/f^2$ ультразвука в цельной крови.

Для изучения применения частотных зависимостей поглощения ультразвука в цельной крови были исследованы частотные зависимости поглощения ультразвука в цельной крови различных пациентов со значениями скорости оседания эритроцитов (СОЭ) в диапазоне 5 - 110 мм/час, измеренные по методу Вестрегрена.

Все полученные зависимости были аппроксимированы степенной функцией $y=Ax^{-B}$. Коэффициент корреляции при такой аппроксимации составил более 0.9 для различных образцов. После обработки полученных данных построена зависимость значения СОЭ в цельной крови от коэффициента A степенной функции, которая представлена на рис. 4.

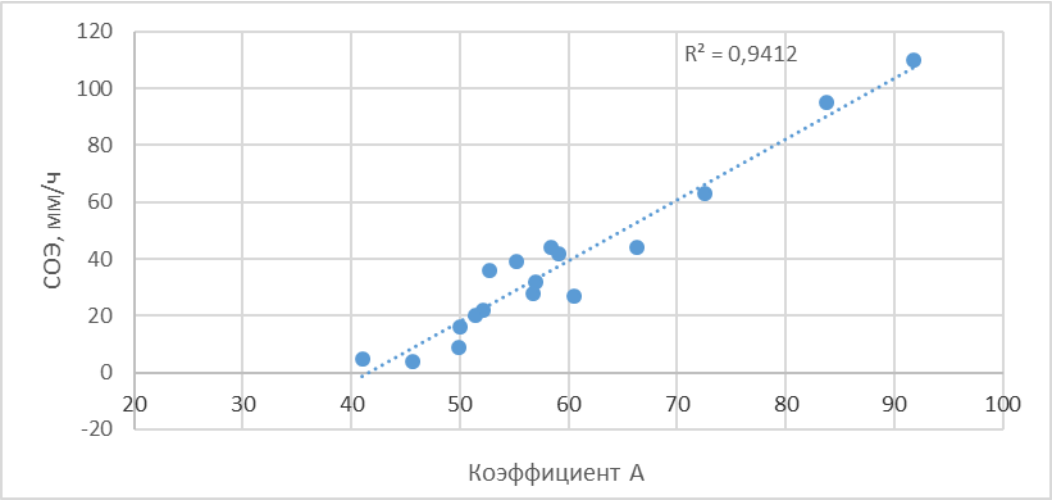


Рис. 4. Величина СОЭ в цельной крови в зависимости от коэффициента А.

Коэффициент корреляции полученной зависимости при аппроксимации линейной функции составил 0.94.

Заключение

Проведенные исследования частотных зависимостей поглощения ультразвука в цельной крови показали практическую значимость результатов для разработки безреагентного акустического метода определения скорости оседания эритроцитов (СОЭ). Этот показатель в лабораторной медицинской диагностике важен для оперативного определения наличия и степени воспалительных процессов в организме человека. Акустический метод позволит определять СОЭ в цельной крови пациента без применения реагентов за время порядка 2 минут.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSWR-2026-0017).

Список литературы

1. *Бергман Л.* Ультразвук и его применение в науке и технике. Издательство иностранной литературы. М., 1957.

2. Ультразвук в медицине: физические основы применения. Под ред. К. Хилла, Дж. Бэмбера, Г. тер Хаар. Физматлит. М., 2008.

УДК: 534-8, 534.08 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39661

ВЛИЯНИЕ ДЕФОКУСА АКУСТИЧЕСКОЙ ЛИНЗЫ НА ИЗМЕРЕНИЕ ЗАТУХАНИЯ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ МИКРОСКОПИИ

Петронюк Ю.С.[1,2)], Храмцова Е.А.[1)], Антипова К.Г.[3)], Богаченков А.Н.[1,2)], Григорьев Т. Е.[3,4)], Левин В.М.[1)]

[1)] Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт биохимической физики имени Н.М. Эмануэля Российской академии наук, Москва;

[2)] Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук, Москва;

[3)] НИЦ «Курчатовский институт», Москва;

[4)] Российский технологический университет, Институт тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова, Москва

Тел.: +7(499)137-8347; E-mail: jps7@mail.ru

В работе исследовано влияние дефокусировки акустической линзы на результаты измерения затухания в биополимерных образцах методом акустической микроскопии. Пластинки из полилактида и гидрогеля использовались в качестве экспериментальных образцов. Измерение затухания выполнялось путем регистрации эхосигнала от стеклянной подложки с образцом и без него, расположенной внутри фокальной области зондирующего пучка в иммерсии. Показано, что при наличии образца в измерительном тракте величина амплитуды этого сигнала определяется как затуханием в нём, так и дифракционными потерями, связанными с его положением относительно фокальной плоскости. Данные об изменении амплитуды сигнала в фокальной области в зависимости от дефокусирования линзы V(z) позволяют оценивать систематические ошибки, возникающие при измерении затухания методом акустической микроскопии, и являются основой для развития количественных ультразвуковых методов высокого разрешения.

Ключевые слова: акустическая микроскопия, затухание ультразвука, биоинженерия

PACS: 43.20.Fn, 43.35.Yb

Введение

Импульсная акустическая микроскопия (АМ) активно применяется в материаловедении уже более 30 лет. АМ оказалась востребованной благодаря бурному развитию композитов и потребности в неразрушающих методах мониторинга их объёмной микроструктуры. Помимо визуализации АМ позволяет изучать упругие свойства материалов, выявлять степень их анизотропии, раскрывать физические механизмы наблюдаемых процессов их эволюции и деградации [1]. В биологии и медицине ультразвуковые методы являются неотъемлемой частью исследования тканей и органов, в том числе скорость звука выступает маркером плотности и гидратации тканей, а затухание — показателем их однородности. При микроскопическом исследовании живых клеток по величине акустического затухания можно судить об изменении их количества, функционального состояния и адгезии к подложке. Однако картирование вязкоупругих свойств и затухания методом АМ сопряжено с ограничениями, связанными с использованием фокусированного излучения. Локальное измерение вязкоупругих свойств образцов ограничено их толщиной: для исследования используются тонкие срезы или плоскопараллельные пластинки толщиной не более миллиметра. В противоположном случае деформация фокуса ультразвукового пучка при распространении вглубь образца приводит к искажению результатов измерения; наклонные компоненты оказываются вне апертуры приемника, внося таким образом дополнительные акустические потери.

В данной работе предложена методика измерения затухания объемных продольных упругих волн в биополимерных образцах методом АМ. Экспериментально исследовано влияние акустических свойств и толщины измеряемой пластинки на длину фокальной области зондирующего пучка и амплитуду регистрируемого сигнала, в том числе при смещении образца из фокуса. Пластинки из полимолочной кислоты (ПЛЛА) и гидрогеля (ГГ) толщиной 1 и 2.5 мм использовались в качестве тестовых образцов, так как их акустические свойства приближены к максимально прозрачному, мягкому (ГГ) и существенно отражающему, твердому (ПЛЛА) биологическим образцам, тканям.

1 Материалы и методы

В работе использовался сформованный в виде пластин частично кристаллический ПЛЛА, синтезированный в НИЦ «Курчатовский институт». Пластины толщиной 1 мм получали методом литья под давлением с помощью пресса лабораторного литьевого Thermo Scientific HAAKE MiniJet II. Для получения образцов ПЛЛА с заданной кристалличностью проводили отжиг пластин в вакуумной камере в течение 1 часа при 120 °C. Степень кристалличности ПЛЛА образцов, определенная методом ДСК, составила более 40%.

ГГ полимерные образцы были изготовлены из полиакриламида, водорастворимого синтетического полимера. ГГ на его основе получали свободнорадикальной полимеризацией акриламида и сшивателя – N,N'-метиленбисакриламида. Пластинки синтезировали из раствора мономера с концентрацией 20%, количеством сшивателя – 9 масс.% в присутствии инициирующей системы персультата аммония и N,N,N',N'-тетраметилэтилендиамина. Полученные образцы после синтеза отмывали в дистиллированной воде в течение 7 суток для удаления непрореагировавших компонентов и достижения ими равновесной степени набухания.

Размер образцов составлял 10×10 мм. Их толщина измерялась АМ методом с точностью ±0.01 мм, ее среднее значение указано в табл. 1. Плотности образцов измерялись методом гидростатического взвешивания с точностью ±0.01 г/см^3.

Ультразвуковые исследования проводились на сканирующем импульсном акустическом микроскопе (СИАМ-2017, ИБХФ РАН). Ультразвуковые измерения выполнялись акустическими объективами с частотой 50 МГц и угловой апертурой 8 и 11 градусов. Принципиальная схема измерительной ячейки представлены на рис. 1.

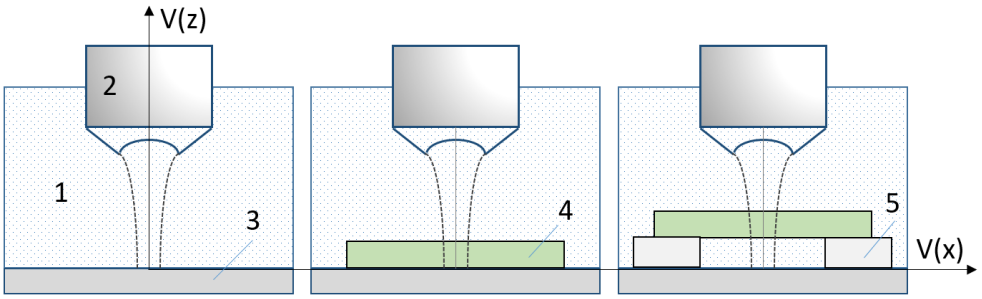


Рисунок 1. Принципиальная схема акустической измерительной ячейки: 1 – иммерсия (дистиллированная вода), 2 – акустический излучатель, 3 – отражающая подложка (стекло), 4 – образец, 5 – дополнительные опоры под образцом толщиной 0.2 мм.

В процессе измерения экспериментальные образцы помещались на стеклянную подложку с известными акустическими параметрами (ρ = 2250 г/см^3, c = 5970 м/с). В качестве опорного сигнала использовалось зеркальное отражение от подложки, поверхность которой располагалась строго в центре фокальной области. Положение фокуса определялось по величине амплитуды регистрируемого эхосигнала, которая достигала максимума в фокальном положении. Акустические измерения выполнялись локально внутри фокальной перетяжки, диаметр и длина которой предварительно оценивались по известным формулам [2]: $a = 0.61\lambda/sin\,\theta$ и $b = 2\lambda/(1 - cos\,\theta)$, где $\lambda = c/f$ – длина волны ультразвука в среде, θ – угловая апертура линзы, т.е. максимальное отклонение

наклонных компонент зондирующего пучка от нормали к отражающей поверхности, c – скорость звука в среде, f – частота.

Определение величины затухания выполнялось по формуле [2]: $\alpha = 10 \cdot (1/2d) \cdot \lg(A/A_0)$, где d – толщина образца, A и A_0 – амплитуды эхоимпульса от подложки при наличии образца и без него. В качестве референсного сигнала применялся короткий ультразвуковой импульс длительностью 40 нс от подложки в фокусе. Для регистрации сигнала использовался модуль аналого-цифрового преобразователя с частотой 500 МГц. Скорости звука определялись эхо-импульсным методом АМ с погрешностью 1% по формуле $c = 2d/t$, где t – измеренное время задержки сигнала на заданном пути в иммерсии и в образце.

2 Результаты эксперимента и обсуждение

Характеристики используемых акустических фокусирующих объективов, расчётные параметры длины и диаметра фокальной области и результаты измерения затухания в образцах представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры фокальной области зондирующего ультразвукового пучка, иммерсионной среды и экспериментальных образцов

Параметры фокусирующего излучателя			
Частота звука f, МГц	50		
Апертура линзы θ, град.	8	11	иммерсия (вода)
Параметры фокальной области			
Длина волны λ, мкм	29.8		иммерсия (вода)
	30.4		ГГ
	46.0		ПЛЛА
Диаметр фокуса a, мкм	130	95	иммерсия (вода)
	130	95	ГГ
	130	95	ПЛЛА
Длина фокуса b, мм	6.1	3.3	иммерсия (вода)
	6.0	3.2	ГГ
	3.8	2.0	ПЛЛА
Свойства тестового образца			
Толщина образца d, мм	2.50		ГГ
	1.02		ПЛЛА

Плотность ρ, г/см^3	1.00		иммерсия (вода)
	1.02		ГГ
	1.29		ПЛЛА
Скорость звука c, км/с	1.49		иммерсия (вода)
	1.52		ГГ
	2.30		ПЛЛА
Затухание α, дБ/мм	0.2 ±0.01	0.2 ±0.02	ГГ
	0.3 ±0.01	0.3 ±0.02	ГГ*
	2.0 ±0.50	2.5 ±0.03	ПЛЛА
	3.3 ±0.02	3.5 ±0.02	ПЛЛА*

* с использованием опоры толщиной 0.2 мм

Полученные данные о диаметре и длине фокальной перетяжки позволяют оценить влияние образца и эффектов преломления в нем на размеры фокальной области, в которой пучок имеет волновой фронт близкий к плоскому и где будут выполнены акустические измерения. Прежде всего ее диаметр остается неизменным, учитывая закон Снэллиуса: $a_0 = a = 0.61 \cdot f^{-1} \cdot (c_0/\sin\theta_0) = 0.61 \cdot f^{-1} \cdot (c/\sin\theta)$. Параметры образца могут влиять на длину фокуса; с учетом толщины образца d можно записать: $\Delta b = d(1 - b/b_0)$. Подставляя параметры для образцов и линз (табл. 1) получим, что в нашем случае длина фокальной области сокращается на 50 и 400 мкм для ГГ и ПЛЛА, соответственно.

Выражение для сигнала от подложки в общем виде можно записать в виде:

$$V(z,t) = \int A(\theta,\omega)\left\{R(\theta,\omega)e^{-[\alpha_0(\omega)\cdot 2z + \alpha(\omega)\cdot 2d]}\right\}e^{-i\omega\left[t_0 + 2d\left[\frac{1}{c}-\frac{1}{c_0}\right]+\frac{2z}{c_0}\right]}d\omega,$$

где $A(\theta,\omega)$ – апертурная функция системы приемник/излучатель, $R(\theta,\omega)$ – коэффициент отражения от подложки, z – смещение подложки из фокальной плоскости. Параметры образцов входят в это выражение через коэффициент $R(\theta,\omega)$, который включает акустические потери на границах и коэффициент затухания $\alpha(\omega)$. Кроме того, амплитуда сигнала может меняться в зависимости от смещения подложки из фокальной плоскости z. На рис. 2 показана такая экспериментальная зависимость $V(z)$ для акустического пучка с угловой апертурой 8 градусов для ГГ (слева) и ПЛЛА (справа). Измерения показывают, что смещение референсной плоскости из центра перетяжки ($z = 0$) приводит к накоплению дифракционных потерь, которые могут быть существенными (0.6-0.9 дБ) вблизи края фокальной области, где формируется сферический волновой фронт. Если рассматривать зависимости $V(z)$ для подложки без образца как калибровочную кривую,

то вычитание ее из экспериментальной $V(z)$ позволит измерять затухание в образце с точностью до 3-6%.

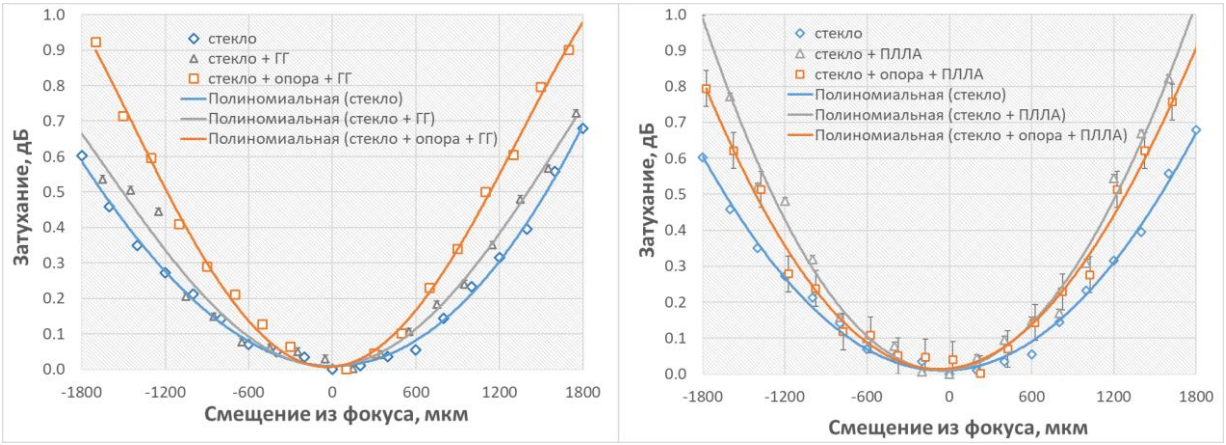


Рисунок 2. Экспериментальное изменение величины затухания эхосигнала в зависимости от смещения подложки с образцом из центра фокальной области (z = 0). Линза 50 МГц, угловая апертура 8 градусов.

В случае если контакт образца с подложкой не может быть качественное реализован, для измерения затухания могут быть использованы дополнительные опоры (рис. 1в). Для минимизации дифракционных потерь суммарная толщина опоры с образцом не должна превышать длину фокальной области. В тоже время толщина опоры должна быть достаточной, чтобы избежать искажения величины амплитуды регистрируемого от подложки сигнала из-за интерференции эхоимпульсов от задней границы образца и поверхности подложки. В нашем случае использование дополнительной опоры толщиной 0.2 мм для образца ПЛЛА не привело к существенному увеличению погрешности измерения затухания (рис. 2, справа). Это видно по соотношению зависимостей $V(z)$ «стекло + ПЛЛА» и «стекло + опора + ПЛЛА», разница между которыми составляет 0.1 дБ.

Ультразвуковые исследования проведены в рамках выполнения государственного задания №122041400112-8. Изготовление матриксов проведено в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

Список литературы

1. *Khramtsova E., Petronyuk Y., Antipova C., Sharikov R., Bogachenkov A., Malakhov S., Bednik D., Dmitryakov P., Grigoriev T.* Non-Invasive Analysis of Bulk and Surface Remodeling of Non-Woven PLLA and Fiber-Sponge PLLA/Chitosan Scaffolds in Cell Culture Environment // Molecules 2025, **30**, 4657.
2. *Лепендин Л.Ф.* Акустика. Москва: Высшая школа, 1978. С. 181.

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39662

Влияние амплитудно-частотных и геометрических характеристик пьезополимерных детекторов на эффективность сканирующей оптоакустической визуализации биологических тканей

Курников А.А., Прудников М.Б., Казаков В.В., Воробьев В.А., Чекмарева Д.А., Глявина А.М., Орлова А.Г., Субочев П.В.

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук, Нижний Новгород

Тел.: +7(920)058-70 29$ E-mail: kurnikov.1997@ipfran.ru

Исследования в области визуализации биологических тканей важны в ряде задач, таких как оценка состояния периферических сосудов при диагностике сосудистых заболеваний, исследования развития раковых моделей на лабораторных животных и изучение методов терапии. Для этого требуются неинвазивные методы, способные визуализировать микрососуды размерами от десятков до сотен микрометров на глубине до 1–2 мм. Сканирующая оптоакустическая визуализация, сочетающая лазерное оптическое возбуждение и ультразвуковое детектирование, представляет собой перспективный метод для данных приложений. Эффективность метода напрямую зависит от параметров ультразвуковых детекторов. Они должны быть высокочувствительными и широкополосными для регистрации коротких оптоакустических сигналов (десятки наносекунд) от микронных источников, амплитуда которых существенно затухает при распространении к приемнику. Ключевую роль также играет геометрия детектора. В работе исследованы возможности пьезополимерных детекторов для оптоакустической сканирующей визуализации. Проанализировано влияние их амплитудно-частотных характеристик и геометрии на качество визуализации. Показано, что детекторы на основе ПВДФ-ТрФЭ обеспечивают высокую чувствительность (шумовой эквивалент давления <10 Па в полосе 1–30 МГц). Благодаря эластичности материала возможно изготовление кольцевых и сферически фокусирующих детекторов с высокой числовой апертурой (NA~0.9), что также существенно повышает качество визуализации сосудистых сетей.

Благодарности: работа поддержана грантом РНФ (проект № 25-45-20023)

Ключевые слова: оптоакустическая визуализация, ультразвуковые детекторы, пьезополимерные пленки, субпаскальная чувствительность

Influence of the frequency response and geometric characteristics of piezopolymer detectors on the performance of scanning optoacoustic imaging of biological tissues

Kurnikov A.A., Prudnikov M.B., Kazakov V.V., Vorobyev V.A., Chekmareva D.A., Glyavina A.M., Orlova A.G., Subochev P.V.

A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod

Phone: +7(920 058-70-29

E-mail: kurnikov.1997@ipfran.ru

Research in biological tissue imaging is important for a number of tasks, including assessment of peripheral vessels in the diagnosis of vascular diseases, investigation of cancer model development in laboratory animals, and studies of therapy methods. These applications require noninvasive techniques capable of visualizing microvessels ranging from tens to hundreds of micrometers at depths up to 1-2 mm. Scanning optoacoustic imaging, which combines laser optical excitation and ultrasonic detection, is a promising method for these applications. The performance of the method directly depends on the parameters of the ultrasonic detectors. They must be highly sensitive and broadband in order to record short optoacoustic signals (tens of nanoseconds) from micron-scale sources whose amplitude is substantially attenuated as they propagate to the receiver. Detector geometry also plays a key role. In this work, the capabilities of piezopolymer detectors for scanning optoacoustic imaging are investigated. The influence of their frequency response and geometry on imaging quality is analyzed. It is shown that PVDF-TrFE-based detectors provide high sensitivity (noise-equivalent pressure <10 Pa in the 1-30 MHz band). Owing to the elasticity of the material, annular and spherically focusing detectors with a high numerical aperture (NA~0.9) can be fabricated, which also substantially improves the quality of vascular network visualization.

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Science Foundation (project No. 25-45-20023).

Keywords: optoacoustic imaging, ultrasonic detectors, piezopolymer films, sub-pascal sensitivity

УДК: 534.7 DOI: 10.34756/GEOS.2026.17.39663

Сравнительный анализ методов акустической диагностики легочной гипертензии

М.В Рябков[1,a], Е.Е. Утешева[1,b], В.В. Грамович [2,c], К.В. Дмитриев[1,d]

[1]МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

[2]ФГБУ «НМИЦ кардиологии им. ак. Е.И. Чазова» Минздрава России, отдел легочной гипертензии и заболеваний сердца, Москва, Россия

E-mail: [a]qbba@ya.ru, [b]utesheva.e.e@mail.ru, [c]vgramovich@yandex.ru, [d]kdmitrie@gmail.com

В рамках исследования проведен сравнительный анализ различных подходов к диагностике легочной гипертензии. Сравнение осуществлялось с использованием базы данных, включающей 213 пациентов с синхронными записями фонокардиограмм и электрокардиограмм, а также измерениями среднего давления в легочной артерии. Качество моделей оценивалось по метрикам средней абсолютной ошибки, чувствительности, специфичности и показателю ROC AUC.

Ключевые слова: диагностика сердечных заболеваний, легочная гипертензия, глубокое обучение, обработка сигналов, фонокардиография.

Comparative Analysis of Methods for Acoustic Diagnosis of Pulmonary Hypertension

M.V. Ryabkov[1,a], E.V. Utesheva[1,b], V.V. Gramovich[2,c], K.V. Dmitriev[1,d]

[1] *Department of acoustics, Faculty of Physics, M.V. Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia.*

[2] *Department of Pulmonary Hypertension and Heart Diseases, National Medical Research Center of Cardiology named after Academician E.I. Chazov, Moscow, 121552, Russia.*

E-mail: [a]qbba@ya.ru, [b]utesheva.e.e@mail.ru, [c]vgramovich@yandex.ru, [d]presentatio@mail.ru

The study presents a comparative analysis of various approaches to the diagnosis of pulmonary hypertension. The comparison was conducted using a dataset comprising 213 patients with synchronous recordings of phonocardiograms and electrocardiograms, as well as measurements of mean pulmonary arterial pressure. Model performance was evaluated using mean absolute error, sensitivity, specificity, and ROC AUC metrics.

Keywords: cardiovascular disease diagnosis, pulmonary hypertension, deep learning, signal processing, phonocardiography.

PACS: 43.60.-c

Введение

Легочная гипертензия (ЛГ) — синдром, характеризующийся повышенным средним давлением в легочной артерии (ср. ДЛА), который зачастую приводит к летальному исходу без своевременного старта лечения. В то же время ее диагностика малодоступна в первичном звене здравоохранения в силу высокой стоимости аппаратуры и дефицита высококвалифицированных кардиологов. В этой связи перспективным направлением является использование методов фонокардиографии в сочетании с алгоритмами автоматизированного анализа сигналов. В рамках исследования проведен сравнительный анализ таких подходов к диагностике ЛГ, в том числе с разработанным авторским алгоритмом методом на основе глубокого обучения. Методы тестировались на базе данных (БД), собранной в кардиоцентре им. ак. Е.И. Чазова с помощью устройства, реализованного на физическом факультете МГУ. Следует отметить, что сформированная выборка пациентов с ЛГ является крупнейшей среди опубликованных исследований, посвященных акустической диагностике данного синдрома.

2 Методология

Сравнение методов (табл. 1) проводилось по следующим показателям: средняя абсолютная ошибка (MAE) величины ср. ДЛА, чувствительность (sens), т.е. способность метода правильно выявлять пациентов с заболеванием, и специфичность (spec), т.е. способность метода правильно определять здоровых людей. Для некоторых методов представлена также метрика оценки качества бинарной классификации ROC AUC, численно равная площади под графиком зависимости истинно положительных от ложноположительных определений ЛГ при различных порогах отнесения пациентов к группе больных по уровню ср. ДЛА. Показатели были отдельно вычислены для четырех выборок. В первую выборку вошли все 213 пациентов; во вторую – 173 пациента, по которым в клинике была проведена как катетеризация, так и процедура оценки давления с использованием эхокардиографии, в третью – 111 пациентов, ср. ДЛА которых лежит в диапазоне 35-75 мм рт. ст., в четвертую вошли 106 пациентов из третьей выборки, по которым была проведена как катетеризация, так и процедура оценки давления с использованием эхокардиографии. Для третьей и четвертой выборок предсказания давлений клиппировались в интервал ср. ДЛА 35-75 мм рт. ст. (т.е. если предсказание того или иного метода выходило за верхнюю или нижнюю границу диапазона, оно полагалось равным этой

границе). Необходимость разделения выборки на четыре части возникла по двум причинам. Во-первых, разные методы работают в разных диапазонах ср. ДЛА. Во-вторых, некоторые методы не предсказывают ср. ДЛА напрямую, и только определяют задержку между компонентами второго тона сердечной деятельности. Эта задержка связана со ср. ДЛА, но эмпирическая формула для перехода от задержки к давлению получена только для давлений 35-75 мм рт. ст [1]. Чтобы судить о качестве работы алгоритма, приведены также значения при наивном предсказании значения ср. ДЛА, равном 55 мм рт. ст. – середине диапазона 35-75 мм рт. ст.

3 Методы диагностики

3.1 Катетеризация

«Золотым стандартом» для оценки ср. ДЛА в легочной артерии и, соответственно, выявления ЛГ является инвазивный метод катетеризации правых отделов сердца (КПОС) [2]. В настоящем исследовании значения ср. ДЛА, полученные при КПОС, используются в качестве референсных (эталонных) для оценки точности альтернативных методов диагностики. Несмотря на наилучшую точность определения ср. ДЛА, метод КПОС обладает существенными недостатками. КПОС инвазивна, происходит в условиях рентгеноперационной и выполняется только высококвалифицированными кардиологами. Оснащение комнаты под проведение данной процедуры требует существенных финансовых затрат [3]. Кроме того, КПОС сопряжена с рисками осложнений. В связи с вышеперечисленными факторами здоровым пациентам КПОС не назначается без предварительного проведения эхокардиографии. Поэтому для пациентов с низкими значениями ср. ДЛА сравнение методов происходит относительно давления, полученного только методом эхокардиографии, тогда как для пациентов с повышенными давлениями – относительно ср. ДЛА, измеренного с помощью катетеризации.

3.2 Эхокардиография

Эхокардиография представляет собой неинвазивный ультразвуковой метод визуализации сердца, основанный на доплеровском сдвиге. Косвенный характер измерений обусловливает наличие погрешности определения ср. ДЛА, которая, по данным литературы, может достигать порядка 10 мм рт. ст. [4]. Несмотря на ограниченную точность, эхокардиография является основным скрининговым методом благодаря своей неинвазивности, широкой доступности (относительно КПОС) и возможности многократного применения без значимых рисков для пациента.

3.3 Вариационный метод

Вариационный метод основан на разделении аортальной и легочной компонент звука второго тона сердца. Идея использования данного метода для диагностики ЛГ была предложена в [5]. Каждая компонента сигнала второго тона моделируется гармоническим сигналом конечной длительности с экспоненциальной огибающей. В качестве оптимизируемых параметров выступают амплитуда, показатель экспоненты, длительность, частота и фаза. Модель основывается на предположении, что степень тяжести ЛГ коррелирует с величиной задержки между компонентами второго тона. Аналогичный метод, но с определением задержки с помощью преобразования Вигнера-Вилля рассматривался в [1]. Однако, несмотря на хорошую интерпретируемость, предсказательная способность таких методов оказалась не очень высокой (см. табл. 1). Связано это с рядом факторов, основными из которых, вероятно, являются следующие: при малых задержках (особенно это касается здоровых пациентов), аортальная и пульмональная компоненты в сумме ведут себя как один сигнал и визуально задержка не видна (вне зависимости от того, в каком представлении происходит изучение сигналов – временном или время-частотном). Кроме того, задержка между аортальной и пульмональной компонентами существенно зависит от фазы дыхания [6], а значит будет отличаться в зависимости от конкретной реализации записи данных.

3.4 Методы на основе машинного обучения

Альтернативой являются методы, ориентированные на извлечение расширенного набора признаков из сигналов ФКГ. Так, в [7] предложен универсальный программный инструментарий «PyTools» для анализа фонокардиограмм, не требующий синхронизации с ЭКГ-сигналом. Метод основан на последовательной обработке сигнала, включающей сегментацию сердечных тонов с использованием скрытой полумарковской модели (HSMM) и извлечения признаков во временной и частотно-временной областях. Далее извлеченные признаки можно подавать на вход простейшей нейросети и осуществлять процедуру машинного обучения. В рамках исследования признаки подавались на вход модели, основанной на градиентном бустинге с использованием библиотеки CatBoost. Такой подход в совокупности позволяет учитывать не только временну́ю структуру сердечных тонов, но и их морфологические и спектральные особенности, что расширяет диагностический потенциал метода по сравнению с анализом одной лишь задержки.

3.5 Методы на основе глубокого обучения

Более продвинутой версией подобных алгоритмов являются те, что основаны на глубоком обучении, при котором признаки не детерминированы, а извлекаются

автоматически. Такой алгоритм был предложен в [8]. Алгоритм включает в себя несколько шагов. На первом шаге происходила сегментация тонов с применением синхронных сигналов ЭКГ. Применялся алгоритм семантической сегментации на основе сверточной нейронной сети с архитектурой «кодировщик–декодировщик». Модель формировала вероятностные маски QRS-комплексов, Т-волн и фонового сигнала, на основании которых осуществлялось автоматическое определение положений R-зубцов и конечных точек Т-волн. На втором шаге осуществлялось вейвлет-преобразование с использованием комплексного вейвлета Морле. На третьем шаге вейвлет-преобразования сигналов ФКГ подавались на вход нейросети resnet18, а результаты предсказания давления нейросетью сравнивалась с истинными и происходила автоматизированная подстройка весов модели методом градиентного спуска с целью минимизации средней абсолютной ошибки (MAE) предсказания ср. ДЛА моделью. Для минимизации MAE использовалось предобучение на выборке из 2000 сгенерированных пациентов, по каждому из которых было смоделировано от 2 до 10 сигналов ФКГ с использованием модельных сигналов второго тона из статьи [5].

Ниже приведена итоговая таблица, полученная в результате проведения сравнительного анализа методов диагностики ЛГ. В ячейках, где значения не определены, проставлен прочерк. Представленные результаты показывают, что среди алгоритмов обработки ФКГ наилучшее значения MAE достигается методом на основе глубокого обучения, особенно на полной выборке пациентов. В то же время в диапазоне ср. ДЛА 35–75 мм рт. ст. различия между методами уменьшаются, а общее качество предсказания снижается, что может указывать на сложность извлечения диагностических признаков в данном диапазоне.

Таблица 1

Сравнение методов диагностики ЛГ

Выборка по ср. ДЛА, мм рт. ст.	Кол-во пациентов	Показатель	Наивное предск. среднего	ЭхоКГ	PyTools [7]	Вариац. метод [5]	Глуб. обуч. [8]
0-200	213	MAE	18.52	—	14.61	—	12.73
		Sens	1.00	—	0.92	—	0.96
		Spec	0.00	—	0.36	—	0.50
		ROC AUC	0.50	—	0.81	—	0.93
0-200*	173	MAE	16.83	7.57	15.03	—	13.03
		Sens	1.00	0.99	0.92	—	0.96
		Spec	0.00	0.73	0.28	—	0.48
		ROC AUC	0.50	0.98	0.80	—	0.93
35-75	111	MAE	8.59	—	11.24	10.26	10.16
35-75*	106	MAE	8.51	7.55	11.46	10.04	10.48

** Подвыборка из пациентов, по которым есть как данные ЭхоКГ, так и катетеризации*

Заключение

Полученные результаты подтверждают перспективность развития акустических методов как доступной альтернативы существующим диагностическим подходам. В то же время на текущем этапе их точность остается недостаточной для полноценного клинического применения, что требует дальнейшего повышения предсказательной способности моделей, в особенности в части корректной идентификации здоровых пациентов.

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова.

Список литературы

1. *Андреев В.Г., Красикова М.В., Грамович В.В., Корольков А.И., Выборов О.Н., Данилов Н.М., Мартынюк Т.В., Родненков О.В., Руденко О.В.* Частотно-временной анализ звуков второго тона сердца для оценки давления в легочной артерии. // Акуст. журн. 2020. **66**, № 5. С. 556.
2. *Rosenkranz S., Preston I.R.* Right heart catheterisation: best practice and pitfalls in pulmonary hypertension. // Eur. Respir. Rev. 2015. **24**, N 138. P. 642.
3. *Reed G.W, Tushman M.L, Kapadia S.R.* Operational Efficiency and Effective Management in the Catheterization Laboratory. // J. Am. Coll. Cardiol. 2018. **72**, N 20. P. 2507.
4. *Wong J.M., Lai E., Brent B.N., Schiller N.B., Shaw R.E., Rosenblatt A.S.* Noninvasive Assessment of Mean Pulmonary Artery Pressure. // J. Am. Soc. Echocardiogr. 2026. **39**, N 3. P. 294.
5. *Корольков А.И., Андреев В.Г., Грамович В.В., Алеевская А.М., Мартынюк Т.В., Руденко О.В.* Вариационный метод разделения аортальной и легочной компонент звука второго тона сердца. // Докл. РАН. Физика, техн. науки. 2020. **493**, № 1. С. 84.
6. *Tang H., Chen H., Li T.* Discrimination of Aortic and Pulmonary Components from the Second Heart Sound Using Respiratory Modulation and Measurement of Respiratory Split. // Appl. Sci. 2017. **7**, N 7. P. 690.
7. *Müller K., Hatvani J., Koller M., Goda M.A.* PyPCG: a Python toolbox specialized for phonocardiography analysis. // Physiol. Meas. 2024. **45**, N 12. P. 125007.
8. *Ryabkov M.V., Gramovich V.V., Dmitriev K.V.* Analyzing Heart Tones to Diagnose Pulmonary Hypertension. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. **90**, N 1. P. 118.

УДК: 534.7. DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39664

Индекс звуковой энергии шумов форсированного выдоха человека: Определение диагностической границы нормы

А.Е. Костив[a], В.В. Малаева[b]

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН
690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, д.43
E-mail: [a]kostiv@poi.dvo.ru, [b]malaeva@poi.dvo.ru

Биомедицинские сигналы могут быть обработаны и проанализированы для извлечения количественных признаков, которые используются для классификации сигналов, а также получения решающих правил. Целью работы является исследование пригодности акустического признака и теста на его основе для принятия диагностических решений. В качестве биологического сигнала использован шум форсированного выдоха здоровых добровольцев и обследуемых с обструкцией дыхательных путей. Рассматриваются акустические показатели: звуковая энергия за первую секунду; отношение звуковой энергии за первую секунду к общей звуковой энергии - индекс звуковой энергии. Определяется: чувствительность и специфичность, кривая операционных характеристик теста, зависимость эффективности теста от границы нормы. Находится диагностическая граница нормы (значение решающего порога) по обучающей выборке анализом графика эффективности теста. Получение границы нормы на кривой эффективности теста позволяет подобрать оптимальное соотношение между чувствительностью и специфичностью.

Показана пригодность индекса звуковой энергии и теста на его основе для принятия диагностических решений. Определена граница интервала нормы теста на основе индекса звуковой энергии для профилактического и клинического тестирования.

Ключевые слова: аускультация, респираторная акустика, ROC-кривая, порог теста, истинно положительный, бинарная классификация.

Energy index of forced exhalation sounds: determination of the diagnostic cutoff value

A.E. Kostiv[a], V.V. Malaeva[b]

Department of Ocean Research Equipment, Acoustic Tomography Laboratory, V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences. Vladivostok 690041, Russia.
E-mail: [a]kostiv@poi.dvo.ru, [b]malaeva@poi.dvo.ru

Biomedical signals can be processed and analyzed to extract quantitative values which can then be used for signal classification, as well as to obtain decisive rules. The purpose of this study is to

investigate the suitability of acoustic parameters and a test based on those parameters for use in making diagnostic decisions. Forced exhalation sounds of healthy volunteers and subjects who have been diagnosed with pulmonary obstruction were the biological signals being tested. The acoustic parameters used in this study were: sound energy in the first second, and the ratio of sound energy in the first second to total sound energy—the sound energy index. The following test characteristics were determined: sensitivity, specificity, receiver operating characteristic curve, and how dependent the effectiveness of the test was on the diagnostic cutoff value was then analyzed. The diagnostic cutoff value (decision threshold) was determined from the training sample by analyzing the test effectiveness graph. Obtaining the diagnostic cutoff value from the test effectiveness graph allowed the optimal balance between sensitivity and specificity to be identified.

The study demonstrated the suitability of the sound energy index, and the test based on this index, for use in determining a decisive set of rules. The diagnostic cutoff value of the sound energy index test was defined for preventive and clinical testing.

Keywords: auscultation, respiratory acoustics, ROC curve, test threshold, true positive, binary classification

PACS: 43.64.-q

Введение

Биомедицинские сигналы могут быть обработаны и проанализированы для извлечения количественных признаков, которые используются для классификации сигналов, а также получения решающих правил. В качестве биологического сигнала в данной работе использован акустический шум при выполнении человеком маневра форсированного выдоха.

Ранее [1], получены значимые (p<0.05) корреляции акустических и спирометрических параметров: звуковая энергия форсированного выдоха за первую секунду (J_1) и объем форсированного выдоха за первую секунду, r=0.24; а также отношения, называемые *индексами,* звуковой энергии форсированного выдоха за первую секунду к общей звуковой энергии форсированного (*idxJ)* и индекса Генслера, r=0.61. Перечисленные акустические параметры названы аналогами соответствующих спирометрических показателей форсированного выдоха человека.

Цель работы – анализ эффективности акустических параметров и тестов на их основе для принятия диагностических решений, определение границы интервала нормы по операционным характеристикам теста.

1 Эмпирическая база и методы исследования

Исследование включало интервью, обучение каждого участника правильному выполнению маневра форсированного выдоха, регистрацию трахеальных шумов форсированного выдоха и обследование вентиляционной функции лёгких методом спирометрии **(**MasterScreen Body Erich Jaeger, Германия)**.** Каждым исследуемым добровольцем подписано информированное согласие на участие. Этические принципы исследования соответствуют Хельсинкской декларации *Всемирной медицинской ассоциации*.

1.1 Эмпирическая база

Спирометрическое и акустическое тестирование проводились независимо и последовательно в разных попытках дыхательных маневров на группе из 102 человек (67 мужчин и 35 женщин). Результаты акустического тестирования на момент спирометрического обследования были неизвестны. Распределение в группах оценивалось с помощью критерия Шапиро-Уилка. При ненормальном распределении ($p<0.05$) группы описывались медианой (*Me*), нижним (*LQ*), верхним (*HQ*) квартилями, а также в некоторых случаях перцентилями (*P5, P95*).

Изучалась группа добровольцев трудоспособного возраста (*Me*; *LQ*; *UQ*) – 46; 26; 59 лет, рост – 172; 165; 177 см и вес – 76; 65; 85 кг. В результате анализа спирометрических данных сформированы две группы. Группа здоровых добровольцев (55 человек), к которой отнесены лица с нормальными показателями вентиляционной функции лёгких и группа с обструкцией (47 человек), к которой отнесены лица с обструктивным типом нарушений вентиляционной функции лёгких (сужение дыхательных путей и повышения их сопротивления)**.** В качестве признака нарушений такого типа принято изменение *индекса Генслера,* то есть снижение отношения объема форсированного выдоха за первую секунду к форсированной жизненной емкости легких ($ОФВ_1/ФЖЕЛ$) ниже индивидуальной границы нормы (z – оценка) [2].

1.2 Акустический метод

Запись шумов форсированного выдоха выполнялась в области шеи над трахеей датчиком на основе электретного микрофона МКЭ-3 (Октава, Россия) через внешнюю звуковую карту TransitUSB (M-audio, Япония) на персональный компьютер [3]**.**

К анализу принимались попытки форсированного выдоха, вариабельность продолжительности шумового процесса *t* которых не превышала 18%. Всего анализировалось 330 записей шумов дыхательных маневров, из которых 174 отнесены к группе здоровых и 156 к группе с обструкцией дыхательных путей (несколько попыток каждого участника)**.**

В настоящей работе рассчитывались звуковая энергия форсированного выдоха за два временных периода: за первую секунду J_1 с момента появления шумов и за общее время *t*

шумового процесса выполнения дыхательного маневра. Полагаем [4]**,** что площадь под графиком среднеквадратичного значения амплитуды шумового процесса за заданные промежутки времени пропорциональна звуковой энергии. Среднеквадратичное значение определялось в скользящем кадре длительностью 25 мс. Сигнал в таком кадре считается квазистационарным и имеет гауссовское распределение**,** часто используется в аппаратуре кодирования речи [5]**.**

1.3 Операционные характеристики метода

Операционными характеристиками метода является диагностическая чувствительность (*SEN*) и диагностическая специфичность (*SPC*). Которые определялись для всего возможного интервала значений показателя с шагом 0.001 по формулам:

$$SEN_i = \frac{TP_i}{TP_i + FN_i}, \quad (1)$$

где SEN_i- чувствительность, %; TP_i- истинно положительный результат тестирования, шт.; FN_i- ложно отрицательный результат тестирования, шт.; *i*-значение границы нормы $(1,2\ldots k)*10^{-3}$**,** *k* максимально возможное значение показателя.

$$SPC_i = \frac{TN_i}{TN_i + FP_i}, \quad (2)$$

где SPC_i- специфичность, %; TN_i- истинно отрицательный результат тестирования, шт.; FP_i- ложно положительный результат тестирования, шт.**;** *i*-значение границы нормы $(1,2\ldots k)*10^{-3}$**,** *k* максимально возможное значение показателя.

Эффективность теста рассчитывалась по формуле:

$$EFF_i = \frac{SEN_i + SPC_i}{2}, \quad (3)$$

где EFF_i- эффективность диагностического теста, %; SEN_i- чувствительность, %; SPC_i- специфичность, %; *i*-значение границы нормы $(1,2\ldots k)*10^{-3}$, *k* максимально возможное значение показателя.

1.4 Определение интервала нормы

В работе применен клинико-диагностический подход определения интервала нормы. Интервала, в котором присутствуют случаи с отрицательным результатом теста, тогда как вне интервала нормы находятся случаи с положительным результатом теста (с обструкцией). Эффективность теста меняется при изменении границы интервала нормы, потому граница определяется, чтобы обеспечивалась приемлемая эффективность теста. При этом требования к чувствительности или специфичности зависят от назначения теста. Тесты профилактических осмотров учитывают низкую распространенность признака и должны иметь высокую специфичность. Тесты клинических исследований проходят в условиях

высокой распространенности признака, потому для таких тестов особенно важна высокая диагностическая чувствительность. Поэтому, для тестов профилактических осмотров определяется одна граница, а для тестов клинических исследований (в условиях стационара) другая [6]. Дополнительно делалась сравнительная оценка разных подходов определения границ интервала нормы расчётом границы нормы статистическим способом. Для выборок с нормальным распределением значение граница определяется двумя среднеквадратичными отклонениями от среднего значения признака. Так как выборка в данной работе не имеет нормального распределения, то граница нормы определяется как 5% перцентиль (*P5*) для обратной зависимости и 95% перцентиль (*P95*) для прямой, что обеспечивает охват 95% выборки. Такой подход достаточно популярен при обработке медицинских данных [6].

2 Результаты и обсуждение

С учетом ненормального закона распределения данных, описаны акустические показатели групп (табл. 1). Как видно, медианное значение для звуковой энергии за первую секунду форсированного выдоха J_1 незначительно увеличилось от здоровых к

Таблица 1

Статистические характеристики акустических показателей групп

	Группа (*n*=174) здоровых					Группа (*n*=156) с обструкцией				
	Me	*LQ*	*LQ*	*P5*	*P95*	*Me*	*LQ*	*LQ*	*P5*	*P95*
J_1	0.03	0.02	0.05	0.01	**0.11**	0.04	0.02	0.08	0.01	0.19
idxJ	0.96	0.91	0.99	**0.74**	1.00	0.56	0.38	0.72	0.21	0.95

Примечание: Жирный шрифт – граница нормы, рассчитанная статистическим способом.

группе с обструкцией, а межквартильный интервал сильно перекрывается в этих двух группах. Таким образом, статистические характеристики звуковой энергии за первую секунду не показывают дискриминирующие возможности теста. Для индекса звуковой энергии *idxJ* медианное значение существенно уменьшилось от здоровых к группе с обструкцией, а межквартильный интервал здоровых и с обструкцией не перекрывается. То есть, статистические характеристики индекса звуковой энергии уже на этапе описательного статистического анализа показывают дискриминирующие возможности теста.

Для определения чувствительности и специфичности диагностических тестов (формула 1 и 2) построена матрица классификации (Confusion matrix) для каждого значения возможной границы нормы. График описывающий связь чувствительности с обратной величиной специфичности является характеристической кривой (ROC-кривой) теста и показан на рис. 1.

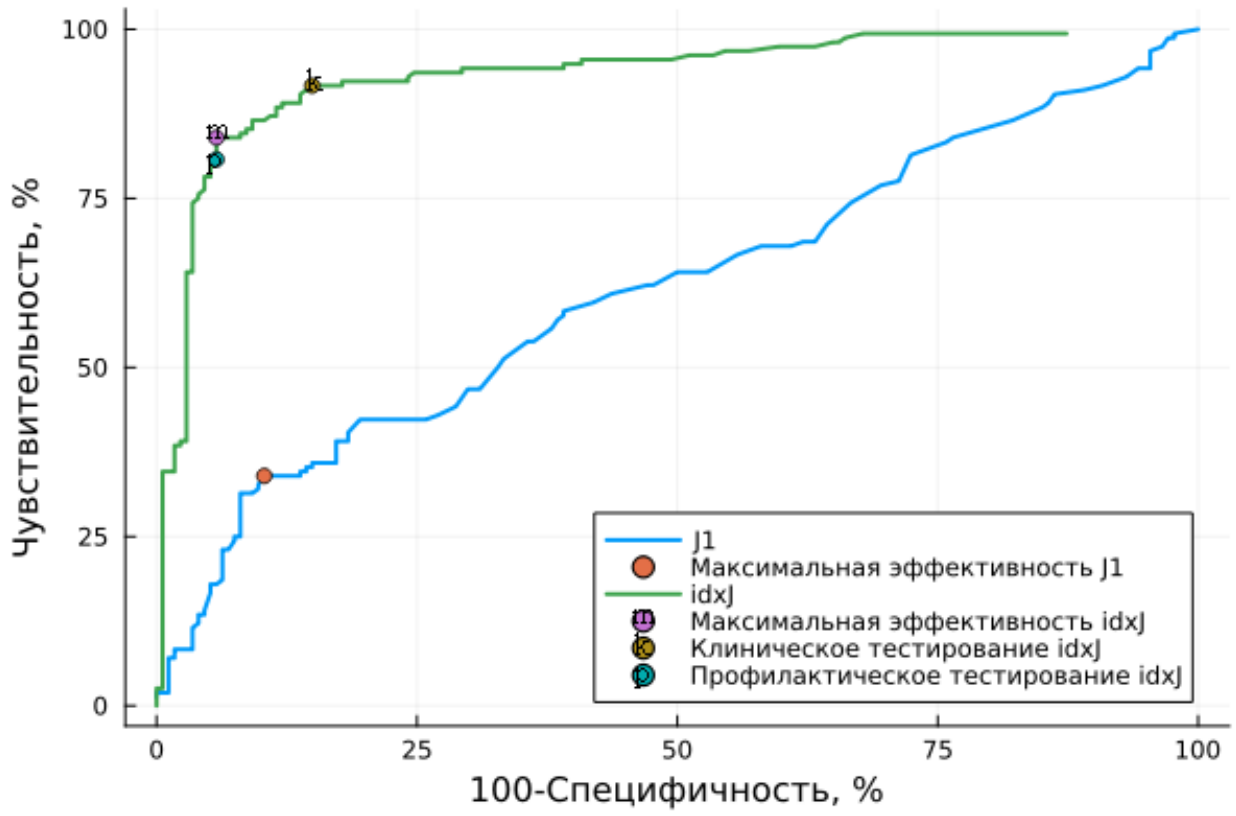


Рисунок 1. Кривая операционных характеристик (ROC-кривая).

Сравнивать потенциальную диагностическую возможность разных тестов можно как по площади под характеристической кривой, так и оценивая эффективность тестов (формула 3). В первом случае видно (рис. 1), что площадь под характеристической кривой по индексу звуковой энергии *idxJ* больше, чем под J_1, значит тест *idxJ* эффективней. Динамика эффективности теста *EFF* по индексу звуковой энергии *idxJ* в зависимости от границы нормы *i* показана на рис. 2. Наилучшая эффективность для этого теста 89% при границе нормы 0.799. Для теста по показателю звуковой энергии за первую секунду форсированного выдоха наилучшая эффективность 62% при границе нормы 0.073. Границы нормы *i* для профилактического (max *SPF*) и клинического (max *SEN)* использования тестов, операционные характеристики (SEN_i, SPF_i), а также эффективность (EFF_i) с этими границами приведены в табл. 3. На рис. 1 и 2 область максимальной эффективности, профилактического, клинического использования показаны цветными маркерами.

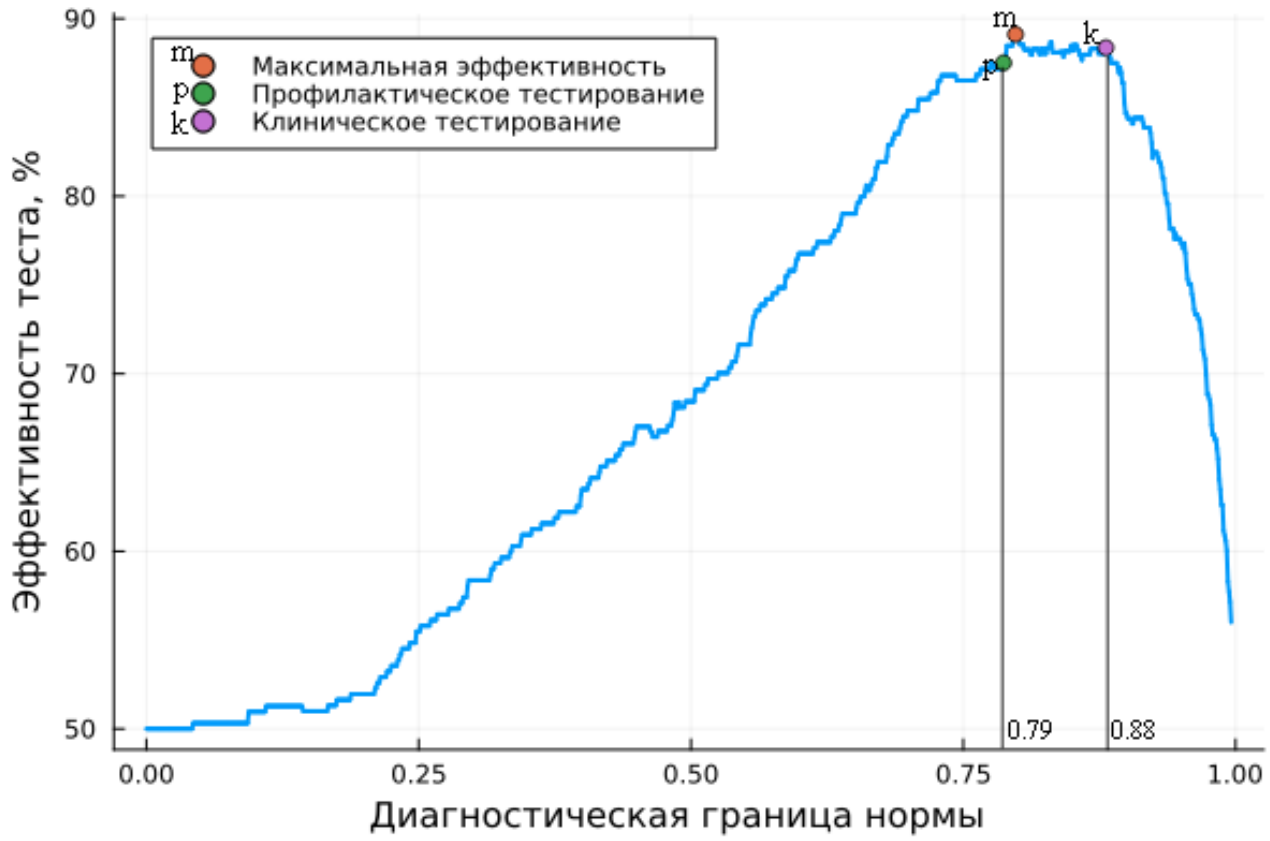


Рисунок 2. Зависимость диагностической эффективности от значения границы интервала нормы.

Тест на основе индекса звуковой энергии с границей нормы 0.74 полученной статистическим способом (табл. 1) по значению перцентиля *P5* имеет чувствительность 78%, специфичность 95% эффективность 86% (формула 3) Такая чувствительность находится в недопустимых значениях пригодности (<80%), а эффективность несколько ниже, чем получена с помощью перебора операционных характеристик (табл. 2).

Таблица 2

Значения границ нормы акустических показателей и соответствующие им операционные характеристики

Показатель	Операционные характеристики	Профилактическое тестирование (max *SPF*)	Клиническое тестирование (max *SEN*)	При макс-ной эффективности теста (max *EFF*)
J_1	*i**	0.075	0.073	0.073
	SEN_i, %	32	34	34
	SPF_i, %	90	90	90
	EFF_i, %	61	62	62
idxJ	*i***	0.788	0.882	0.799
	SEN_i, %	81	92	84
	SPF_i, %	94	85	94
	EFF_i, %	87	88	89

*- значение пропорциональное звуковой энергии, В*с;
**- безразмерная величина.

Заключение

Показана пригодность индекса звуковой энергии и теста на его основе для принятия диагностических решений. Наилучшая эффективность теста составила 89%. Заключение о пригодности позволяют делать высокие 80% и более операционные характеристики теста.

Определена диагностическая граница нормы теста на основе индекса звуковой энергии по обучающей выборке из 330 акустических записей анализом операционных характеристик теста двух назначений теста. Для профилактического тестирования получено значение границы 0.799 с чувствительностью 81%, специфичностью 94%. Для клинического тестирования получено значение границы 0.882 с чувствительностью 92%, специфичностью 85%. Результат тестирования ниже границы нормы указывает на обструкцию дыхательных путей.

Способ определения границы нормы по операционным характеристикам теста, являясь сравнительно трудоемким, позволяет обеспечить лучшую диагностическую эффективность при оптимальном соотношении чувствительности и специфичности для разных назначений.

Авторы благодарят добровольцев, давших согласие на обследование. Работа выполнена при поддержке Лаборатории акустической томографии ТОИ ДВО РАН, государственное задание рег. № 124022100075-6.

Список литературы

1. *Костив А.Е., Малаева В.В.* К вопросу об акустических аналогах спирометрических характеристик форсированного выдоха человека // Акустический Журнал. 2025. **71**, № S5. С. 76.

2. *Quanjer P.H., Stanojevic S., Cole T.J., Baur X., Hall G.L., Culver B.H., Enright P.L., Hankinson J.L., Ip M.S., Zheng J. et al.* ERS Global Lung Function Initiative. Multi-ethnic reference values for spirometry for the 3-95-yr age range: the global lung function 2012 equations. // Eur Respir J. 2012. **40**, N 6. P. 1324.

3. *Костив А.Е.* Аппаратно-программный комплекс и способы оценки параметров сигналов для анализа дыхательных звуков человека: диссертация кандидата технических наук. ТОИ ДВО РАН. В., 2008.

4. *Крокер М.Д., Аренас Д.П.* Основы прямых измерений интенсивности звука и их практические применения // Акустический журнал. 2003. **49**, № 2. С. 199.

5. *Столбов М.Б., Иванов В.Л.* Анализ и модели речевых сигналов. ИТМО. СПб., 2024.

6. *Реброва О.Ю.* Статистический анализ медицинских данных. Применение пакета прикладных программ Statistica. Медиа Сфера. М., 2006.

УДК: 534.292 DOI: 10.34756/GEOS.2026.17.39665

Сравнение характерных типов тепловой абляции различных биологических тканей *ex vivo* под воздействием мощного фокусированного ультразвука

Папикян Л.А., Пестова П.А., Цысарь С.А., Хохлова В.А., Карзова М.М.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Ленинские горы, ГСП-1, Москва, 119991, Россия
Тел.: +7 (495) 939-29-52;
E-mail: papikian.la21@physics.msu.ru

При планировании протоколов облучения мощным фокусированным ультразвуком больших объемов биологической ткани необходимо иметь данные о форме, размере и содержимом единичных разрушений. Эти характеристики разрушений зависят не только от параметров ультразвукового воздействия, но и от типа биологической ткани, её структуры и акустических свойств (скорости, плотности, коэффициента поглощения, коэффициента нелинейности и др.). В работе проведен сравнительный анализ характерных одиночных разрушений, чисто тепловых и тепловых с кипением, полученных в различных биологических тканях *ex vivo*. Рассматривались образцы аутопсийной печени человека, говяжьей печени, говяжьего сердца, операционный материал миомы матки и другие. Воздействие проводилось на глубине 1 см в непрерывном и импульсно-периодическом режимах квазилинейного и ударно-волнового облучения ультразвуком. Использовался одноэлементный излучатель с частотой 1.2 МГц, фокусным расстоянием 120 мм и апертурой 120 мм (Imasonic, Франция). Диапазон акустической мощности составлял от 50 до 500 Вт, амплитуды ударных фронтов в фокусе – до 80 МПа, время облучения – до 1 с. Для каждого типа биологической ткани был определен набор параметров ультразвукового поля, при котором наблюдается тепловое разрушение в форме «рисового зерна», разрушение в форме «головастика» с тепловым контуром и выпаренной в процессе кипения центральной полостью и разрушение смешанного типа, имеющее механически разрушенную «голову» и тепловой «хвост». Работа поддержана грантом РНФ №25-72-10071.

Ключевые слова: высокоинтенсивный фокусированный ультразвук, HIFU, тепловая абляция, ударный фронт.

Comparison of characteristic thermal lesions in various biological tissues *ex vivo* under high-intensity focused ultrasound exposure

Papikyan L.A., Pestova P.A., Tsysar S.A., Khokhlova V.A., Karzova M.M.

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics,
Leninsky Gory, GSP-1, Moscow, 119991, Russia
Phone: +7 (495) 939-29-52;
E-mail: papikian.la21@physics.msu.ru

When planning high-intensity focused ultrasound (HIFU) irradiation protocols for large volumes of biological tissue, it is essential to have data on the shape, size, and internal structure of individual lesions. These lesion characteristics depend not only on the ultrasound exposure parameters but also on the type of biological tissue, its structure, and its acoustic properties (speed of sound, density, absorption coefficient, nonlinearity coefficient, etc.). In this study, a comparative analysis was conducted of characteristic single lesions, both purely thermal and thermal with boiling, obtained in various *ex vivo* biological tissues. The samples included human autopsy liver, bovine liver, bovine heart, surgical uterine fibroid specimens, and others. The exposures were performed at a depth of 1 cm in continuous and pulse-periodic modes of quasi-linear and shock-wave ultrasound. A single-element transducer with a frequency of 1.2 MHz, a focal distance of 120 mm, and an aperture of 120 mm (Imasonic, France) was used. The acoustic power range was from 50 to 500 W, with shock front amplitudes at the focus reaching up to 80 MPa, and exposure times up to 1 s. For each type of biological tissue, a set of ultrasound field parameters was determined to produce "rice grain" shaped thermal lesions, "tadpole" shaped lesions with a thermal contour and a central cavity vaporized during boiling, and mixed-type lesions featuring a mechanically fragmented "head" and a thermal "tail". This work was supported by the RSF grant №25-72-10071.

Keywords: high-intensity focused ultrasound, HIFU, thermal ablation, shock front.

УДК 534.7; 534.292 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39666

Новый комбинированный метод неинвазивного воздействия на поверхностные ткани для эстетической коррекции тела

А.Н. Резниченко, Е.И. Петрова, М.Г. Константинова, Д.И. Макарьев, А.Н. Рыбянец*

Южный федеральный университет, Научно-исследовательский институт физики, 344090, Ростов-на-Дону, Россия

*E-mail: *arybyanets@gmail.com*

Аннотация: Системы и методы терапевтических или эстетических медицинских процедур в целевых тканях тела пациента с использованием HIFU хорошо известны. Основным недостатком применения HIFU для обработки больших объемов ткани является малый объем воздействия в латеральном направлении. В настоящей работе представлен комбинированный метод обработки поверхностных тканей пациента, основанный на одновременном применении конструктивно интерферирующих физических и биологически значимых воздействий: ультразвуковых стоячих волн (УСВ), радиочастотного (РЧ) нагрева и вакуумного массажа. Терапевтический модуль включает следующие компоненты: вакуумную насадку, предназначенную для всасывания целевой ткани; цилиндрический пьезоэлемент, генерирующий цилиндрические стоячие волны в участке ткани, удерживаемом внутри насадки; плунжер, сжимающий ткань и обеспечивающий акустический контакт между пьезоэлементом и тканью, а также металлические радиочастотные (РЧ) электроды, расположенные на плунжере и на внешнем крае насадки. Синергетическое сочетание УСВ с РЧ-нагревом и вакуумным массажем снижает порог кавитации, усиливает кровоток и способствует выведению разрушенных клеточных фрагментов, а также обеспечивает встроенные возможности мониторинга и управления процессом, что открывает широкие перспективы для широкого клинического применения. Результаты экспериментов на тканях ex vivo подтвердили эффективность, безопасность и избирательность разработанного комбинированного метода и конструкции аппарата.

Ключевые слова: комбинационный метод, поверхностные ткани, ультразвуковая стоячая волна, радиочастотный нагрев, вакуумный массаж, синергетическое воздействие.

A new combined method of non-invasive treatment of superficial tissues for body aesthetic correction

A.N. Reznichenko, E.I. Petrova, M.G. Konstantinova, D.I. Makariev, A.N. Rybyanets*

Research Institute of Physics, Southern Federal University, Rostov-on-Don, 344090, Russia

*E-mail: *arybyanets@gmail.com*

Abstract: Systems and methods for therapeutic or aesthetic medical procedures in target tissues of a patient's body using high-intensity focused ultrasound (HIFU) are well known. The main disadvantage of applying HIFU for treating large tissue volumes is the small lateral treatment area. This paper presents a combined method for processing superficial tissues of a patient, based on the simultaneous application of constructively interfering physical and biologically significant effects: ultrasonic standing waves (USW), radiofrequency (RF) heating, and vacuum massage. The therapeutic module includes the following components: a vacuum nozzle designed to draw in the target tissue; a cylindrical piezoelectric element generating cylindrical standing waves in the tissue section held inside the nozzle; a plunger that compresses the tissue and ensures acoustic contact between the piezoelectric element and the tissue; as well as metallic radiofrequency (RF) electrodes located on the plunger and on the outer edge of the nozzle. The synergistic combination of USW with RF heating and vacuum massage lowers the cavitation threshold, enhances blood flow, facilitates the removal of disrupted cellular fragments, and provides built-in monitoring and process control capabilities, thereby opening broad prospects for widespread clinical application. The results of ex vivo tissue experiments confirmed the efficacy, safety, and selectivity of the developed combined method and device design.

Keywords: combined method, superficial tissues, ultrasonic standing wave, radiofrequency heating, vacuum massage, synergistic effect.

PACS: 87.19.Xx; 87.80.−y; 43.35.Yb

Введение

Системы и методы проведения хирургических, терапевтических или эстетических медицинских процедур в целевых тканях тела пациента с использованием электромагнитных полей (ЭМП) и ультразвука хорошо известны [1, 2]. Среди неинвазивных процедур особое место занимают методы, использующие радиочастотное излучение для прямого или косвенного влияния на клетки [3]. Радиочастотная (РЧ) абляция – метод лечения, при котором

переменный ток высокой частоты используется для локального нагревания или разрушения тканей. Неаблятивная РЧ-терапия является одним из самых распространенных терапевтических методов, особенно в косметологии тела [4].

Ультразвуковые методы широко используются для терапевтического лечения переломов и повреждений мягких тканей, онкологических заболеваний и болезни Паркинсона, заживления ран и ожогов, лечения опухолей печени и простаты, хирургических операций и сосудистой окклюзии [2]. Высокоинтенсивный фокусированный ультразвук (HIFU) является одним из эффективных методов выполнения терапевтических, хирургических или косметических процедур в целевых тканях тела пациента [2]. За последние десятилетия появились новые методы и аппараты для ультразвуковой терапии, диагностики и коррекции тела, а также новые возможности и клинические применения, основанные на достижениях в области пьезоэлектрических материалов, проектирования ультразвуковых преобразователей, технологий визуализации и физической акустики [2, 5–8]. Основным недостатком существующих РЧ и HIFU методов для воздействия на поверхностные ткани являются малый объем лизиса, возможное повреждение кожи или низкая эффективность, длительное время процедуры, ограниченное количество доступных участков тела из-за его сложных форм, малой толщины жира и близости костей или жизненно важных органов [5].

Таким образом, можно утверждать, что разработка новых эффективных и безопасных устройств и ультразвуковых методов для терапевтического воздействия на большой объем поверхностных тканей (подкожной жировой ткани и кожи) является одной из приоритетных задач современной эстетической и регенеративной медицины [5].

В данной работе предложен комбинационный метод неинвазивного хирургического, терапевтического, липолитического или косметического воздействия на поверхностные ткани произвольного любого участка тела пациента, основанный на синергетическом взаимодействии РЧ, ультразвука и вакуумного массажа.

1 Комбинационный терапевтический метод

Метод основан на одновременном или последовательном применении конструктивно взаимодействующих физических и биологических факторов: радиочастотного излучения, цилиндрических ультразвуковых стоячих волн (УСВ) и вакуумного массажа. В отличие от всех существующих систем HIFU и нефокусированных систем, ультразвуковая энергия УСВ направлена параллельно поверхности тела и полностью локализована в обрабатываемой области.

Эффективность УСВ сравнима с HIFU, но при этом значительно увеличивается объем обрабатываемой ткани. Циклические изменения узловой картины УСВ с соответствующей

частотой повторения, согласованной с резонансами или временем релаксации живых клеток или компонентов тканей, обеспечивают эффективное динамическое воздействие на ткани.

Синергетическое сочетание УСВ, РЧ-нагрева и вакуумного массажа, снижающего порог кавитации и усиливающего кровоток и выведение продуктов разрушения клеток, вместе с возможностью контроля процесса лечения и диагностики открывает большие перспективы данного метода.

2 Универсальный терапевтический модуль

Универсальный терапевтический модуль для комбинированного лечения поверхностных тканей включает электронный блок, вакуумную систему и терапевтическую головку, содержащую преобразователи УСВ и РЧ (рис. 1, *а*). Терапевтический модуль предназначен для реализации синергетического сочетания конструктивно взаимодействующих физических и биологических факторов: нагревания и кавитации УСВ, РЧ-нагревания, вакуумного массажа и трансдермальной доставки лекарств.



(*а*) (*б*)

Рис. 1. Терапевтический модуль (*а*) и терапевтическая головка для комбинированного лечения поверхностных тканей (*б*).

Терапевтическая головка (рис. 1, *б*), предназначенная для вакуумного всасывания целевой ткани, состоит из: вакуумного стакана; цилиндрического пьезоэлемента, генерирующего цилиндрические УСВ в ткани, находящейся внутри стакана; плунжера, сжимающего ткань и обеспечивающего акустический контакт между пьезоэлементом и тканью и металлических РЧ-электродов, расположенных на плунжере и внешнем крае стакана.

Цилиндрический пьезоэлемент изготовлен из пьезокерамики ЦТС (цирконат-титанат свинца), а РЧ-электроды питаются от РЧ-генератора, обеспечивающего формирование цилиндрических УСВ и РЧ-поля на одинаковых резонансных частотах в целевой тканевой области. Частота, необходимая для создания цилиндрических УСВ внутри ткани, определяется выражением [9–11]: $f_s^n = \frac{cx_n}{2\pi R}$, n = 1, 2, 3,…, где c – скорость звука в ткани, R – радиус цилиндра, x_n – n-й корень функции Бесселя первого рода $J_0(x)$. Каждая допустимая

резонансная частота определяет уникальную узловую картину в разных точках ткани, состоящую из множества узлов и пучностей давления, соответствующих функции Бесселя.

3 Биофизические аспекты синергетического взаимодействия РЧ и УСВ

Ткань, находящаяся в поле УСВ, подвергается их воздействию через тепловые или нетепловые механизмы (кавитация, микропотоки и механические эффекты). Оба механизма наиболее эффективны в области максимального акустического давления (пучностей). В этих точках, расположенных в соответствии с конкретной узловой картиной, наблюдаются два основных эффекта: во-первых, вероятность образования кавитационных пузырьков максимальна при минимальном (наиболее отрицательном) акустическом давлении; во-вторых, генерация тепла максимальна при максимальной амплитуде акустического давления.

Нагревание тканей РЧ-током происходит за счет движения ионов и ориентации полярных молекул (диполей), как в диэлектриках и электролитах [1, 3]. Внутри тканей ионы (Na^+, K^+, Cl^-) переносят электрический ток. Приложение электрического тока вызывает движение ионов и генерацию тепла за счет трения (резистивный нагрев). Количество тепловой энергии, генерируемой локально при термоабляционных процедурах, обычно количественно описывается через удельную мощность поглощения (SAR [Вт/кг]). Для РЧ-абляции SAR зависит от локальной электропроводности ткани и плотности электрического тока вокруг электрода:

$$SAR = \frac{\sigma}{\rho}|E|^2 = \frac{1}{\sigma\rho}|J|^2,$$

где σ – удельная проводимость ткани, ρ – плотность ткани, E – напряженность электрического поля, J – плотность электрического тока. Поскольку плотность электрического тока (и, соответственно, напряженность электрического поля) достаточно велика только вблизи электрода, теплопроводность играет важную роль в нагревании тканей на удалении от него [1].

Проблема теплопередачи при РЧ-абляции может быть описана следующим уравнением теплопередачи, где T – изменяющаяся во времени и пространстве температура ткани [3]:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot k\nabla T + \frac{E^2}{\sigma} - Q_{\text{perf}},$$

где k – теплопроводность ткани, C – удельная теплоемкость, ρ – плотность ткани, Q_{perf} – потери тепла из-за перфузии крови. РЧ-абляция позволяет локально разрушать ткани путем нагревания и нашла клиническое применение при лечении заболеваний, требующих разрушения определенной области ткани.

Синхронное возбуждение РЧ и УСВ полей на одинаковой частоте приводит к мультирезонансному движению ионов и усиливает РЧ-нагревание. В свою очередь, РЧ-

нагревание усиливает УСВ-воздействие и кавитационный лизис тканей. Синергетическое сочетание УСВ и РЧ дополнительно усиливается вакуумным массажем, обеспечивая настоящее комбинированное лечение тканей.

Комбинационная терапия с использованием УСВ и РЧ является нетривиальным, поскольку только в разработанных конфигурациях преобразователей РЧ и УСВ поля совпадают в пространстве и синхронно накладываются, создавая новые биологические и физические эффекты.

4. Биоимпедансная и ультразвуковая диагностика состояния поверхностных тканей

Разработанная конструкция универсального терапевтического модуля для комбинированной терапии допускает одновременную неинвазивную биоимпедансную и ультразвуковую диагностики физиологического состояния и процессов в поверхностных тканях пациента посредством измерения комплексного электрического сопротивления, скорости распространения и коэффициента затухания ультразвука.

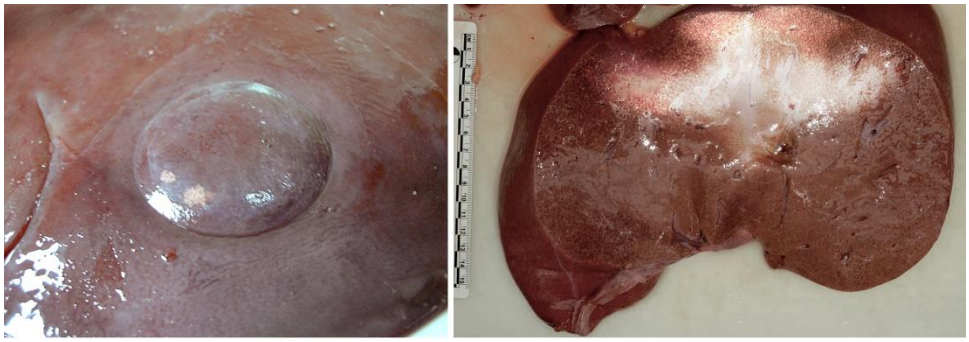
Измерения электрического импеданса поверхностных тканей пациента, а также скорости и затухания ультразвуковых волн выполнялись с использованием разработанного универсального терапевтического модуля при временной фиксации исследуемых поверхностных тканей посредством вакуумной аспирации. Центральный и кольцевой металлические электроды РЧ преобразователя подключались к входным разъемам анализатора импеданса. Сканирование импеданса осуществлялось в частотном диапазоне от 1 кГц до 5 МГц. Скорость распространения и затухание ультразвуковых волн в поверхностных тканях измерялись с помощью проходного и эхо-импульсного ультразвуковых методов с использованием преобразователя УСВ терапевтического модуля.

Показано, что любые изменения температуры тела, а также состояния его структурных компонентов, приводят к регистрируемым изменениям электрического импеданса, скорости звука и затухания ультразвуковой волны. Кроме того, эти параметры биологической ткани существенно изменяются в процессе терапевтического воздействия, отражая физиологические процессы и модификацию структуры и состава ткани (лизис жировой ткани, дегидратация, некроз, коагуляция, изменение кровоснабжения) [3, 4].

Это позволяет использовать разработанный метод и универсальный терапевтический модуль для комбинированной неинвазивной диагностики и мониторинга физиологического состояния поверхностных тканей пациента при различных заболеваниях, а также для контроля и оценки эффективности физиотерапии и других терапевтических процедур.

5 Экспериментальная проверка комбинационной терапии

Эффективность, безопасность и селективность разработанного терапевтического модуля для комбинационной терапии поверхностных тканей была подтверждена ex vivo экспериментами на свежей говяжьей печени. Некоторые результаты комбинационной терапии показаны на рисунке 2.



(*а*) (*б*)

Рис. 2. Термические повреждения говяжьей печени, вызванные комбинацией РЧ и УСВ: (*а*) – вид сверху, (*б*) – вид сбоку.

Как видно из рисунка 2, комбинационное воздействие вакуума, РЧ и УСВ приводит к эффективным и селективным изменениям тканей при минимальном времени и интенсивности воздействия.

Заключение

Результаты ex vivo экспериментов доказали эффективность, безопасность и селективность разработанного комбинационного метода и конструкции терапевтического модуля. Было показано, что синергетическое взаимодействие радиочастотного излучения, ультразвука и вакуумного массажа приводит к выраженным изменениям тканей при минимальном времени воздействия и уровне энергии. Одновременное воздействие физических и биологических факторов, снижающих порог кавитации, усиливающих кровоток и вывод продуктов разрушения клеток, а также возможность контроля процесса лечения и диагностики открывают большие перспективы для разработанного метода. Разработанная конструкция позволяет использовать универсальный терапевтический модуль для комбинированной неинвазивной диагностики и мониторинга физиологического состояния поверхностных тканей пациента при различных заболеваниях, а также для контроля и оценки эффективности физиотерапии и других терапевтических процедур.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности. Проект № FENW-2026-0022).

Список литературы

1. *Vorst A.V., Rosen A., Kotsuka Yo*. RF/Microwave Interaction with Biological Tissues. A John Wiley & Sons Inc., Hoboken, New Jersey, 2006.

2. *Хилл К., Бэмбер Дж., Хаар Г*. Ультразвук в медицине. Физические основы применения. Пер.с англ. Изд. 2, перераб., доп. Физматлит. М., 2008. 544 с.

3. *Haemmerich D.* Biophysics of Radiofrequency Ablation // Critical Reviews in Biomedical Engineering. 2010. **38**, N 1. P. 53.

4. *Markovic J.N., Shortell C.K*. Update on radiofrequency ablation // Perspect Vasc Surg Endovasc Ther. 2009. **21**, N 2. P. 82.

5. *Rybyanets A.N*. Recent Advances in Medical Ultrasound // In "Piezoelectrics and Related Materials: Investigations and Applications". Nova Science Publishers Inc., NY, 2012. P. 143.

6. *Швецова Н.А., Макарьев Д.И., Швецов И.А., Щербинин С.А., Рыбянец А.Н*. Новые методы и конструкции фокусирующих пьезопреобразователей для ультразвуковой диагностики и терапии // Известия РАН. Серия физическая. 2018. **82**, № 3. С. 293.

7. *Rybyanets A.N.* New dynamical focusing method for HIFU therapeutic applications // 9th International Symposium on Therapeutic Ultrasound (ISTU 2009). American Institute of Physics Conference Proceedings. 2010. **1215**. P. 287.

8. *Rybyanets A.N., Lugovaya M.A., Rybyanets A.A.* Multi-Frequency Harmonics Technique for HIFU Tissue Treatment // 9th International Symposium on Therapeutic Ultrasound (ISTU 2009). American Institute of Physics Conference Proceedings. 2010. **1215**. P. 291.

9. *Щербинин С.А., Швецов И.А., Наседкин А.В., Лукьянов И.И., Рыбянец А.Н*. Конечно-элементное моделирование и экспериментальное исследование цилиндрических фокусирующих пьезопреобразователей // Известия РАН. Серия физическая. 2018. **82**, № 3. С. 402.

10. *Sarvazyan A., Ostrovsky L.A., Rubyanets A*. Transient process in acoustic resonators // Acoustical Society of America. 2009 Proceedings on Meeting on Acoustics. 2009. **6**. 020002.

11. *Shvetsov I.A., Petrova E.I., Lugovaya M.A., Shvetsova N.A., Makarev D.I., Rybyanets A.N*. Ferroelectrically Hard Porous Ceramics: Fabrication, Properties and Ultrasonic Transducer Applications // In "Advanced Materials". Springer Proceedings in Physics, NY, 2018. P. 33.

УДК: 534.6.08. DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39667

Измерение скоростей упругих волн и частотно-зависимого затухания в фантомах биологических тканей

Сорокин С.Д.[1)*], Пестова П.А. [1)], Цысарь С.А.[1)], Сапожников О.А.[1)], Кадрев А.В. [2)], Хохлова В.А.[1)]

[1)] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

[2)] Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, медицинский научно-образовательный институт. Россия, 119992, Москва, Ломоносовский проспект, д. 27

*E-mail: *sorokin.sd20@physics.msu.ru*

Разработка фантомов с акустическими и упругими свойствами, близкими к биологическим тканям, является важной метрологической задачей ультразвуковых исследований, необходимой для обеспечения воспроизводимости экспериментов, калибровки оборудования, валидации методов диагностики и терапии. В работе исследованы акустические параметры прозрачных гелевых фантомов на основе силикона, полиакриламида, агарозы и ПВХ-пластизоля, а также образцы говяжьей печени *ex vivo*. Измерены скорость звука, частотно-зависимый коэффициент затухания и сдвиговый модуль. Акустические характеристики определялись методом замещения с использованием пьезоэлектрического преобразователя на экспериментальной установке, обеспечивающей нормальное прохождение ультразвукового импульса через границы образца. Сдвиговый модуль измерялся методом ультразвуковой эластографии. Полученные результаты были сопоставлены с параметрами мягких тканей человека.

Ключевые слова: ультразвук, фантомы, скорость звука, коэффициент затухания, модуль Юнга

Measurement of elastic wave velocities and frequency-dependent attenuation in biological tissue phantoms

S.D. Sorokin[1)*], P.A. Pestova[1)], Tsysar S.A.[1)], Sapozhnikov O.A.[1)], Kadrev A.V. [2)], Khokhlova V.A.[1)]

[1)] Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia.

[2)] Medical Research and Educational Center, Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119992, Russia

*E-mail: *sorokin.sd20@physics.msu.ru*

The development of phantoms with acoustic and elastic properties similar to those of biological tissues is an important metrological problem in ultrasound research, required to ensure experimental reproducibility, equipment calibration, and validation of diagnostic and therapeutic methods. In this study, the acoustic parameters of transparent gel phantoms based on silicone, polyacrylamide,

agarose, and PVC plastisol, as well as *ex vivo* bovine liver samples, were investigated. The speed of sound, frequency-dependent attenuation coefficient, and shear modulus were measured. Acoustic characteristics were determined using the substitution method with a piezoelectric transducer in an experimental setup ensuring normal transmission of the ultrasound pulse through sample interfaces. The shear modulus was measured using ultrasound shear wave elastography. The obtained results were compared with the parameters of human soft tissues.

Keywords: ultrasound, phantoms, speed of sound, attenuation coefficient, Young's modulus

PACS: 43.35.Cg

Введение

Определение акустических параметров материалов, таких как плотность, скорость звука, коэффициент затухания и модуль Юнга, является ключевым условием для решения широкого круга задач в акустике. В частности, в устройствах HIFU-терапии необходимы калибровочные измерения фокусировки ультразвука на образцах, схожих по характеристикам с органами-мишенями [1]. Агарозный и полиакриламидный гели используются для оценки теплового и механического воздействия фокусированного ультразвука на ткань и в качестве акустически-связующей среды [2, 3].

Целью данной работы являлась разработка и апробация экспериментальных методик измерения плотности, скорости звука, коэффициента затухания и модуля Юнга для прозрачных гелевых фантомов, применяемых в медицинской акустике. Исследовались образцы на основе силикона (Tool Decor 15, Германия), 1.5% агарозного геля (UltraPure Agarose, Invitrogen, США), полиакриламидного геля [2], и ПВХ-пластизоля с твердостью 1 и 3 единицы Шора, как с добавлением металлизированной примеси (0.5%), так и без неё [4]. Также были измерены параметры говяжьей печени *ex vivo*.

Экспериментальные методы

Плотность рассматриваемых в работе материалов определялась на основе измерений массы рассматриваемых образцов и объёма вытесненной жидкости, в процессе погружения образцов в воду.

Для определения скорости продольных акустических волн c_l и коэффициента

затухания α в твердотельных образцах, мягких фантомах и ткани печени использовался метод замещения [5]. Была спроектирована и собрана установка, реализующая метод в следующей постановке: измерялись форма и время пробега коротких УЗ импульсов, проходящих через эталонную среду (воду) от излучателя до отражателя и обратно при отсутствии и наличии слоя исследуемого образца внутри системы из оргстекол. Плоскопараллельная система из оргстекол

требуется для поддержания постоянной толщины мягких фантомов при проведении эксперимента. Схема и фотография экспериментальной установки представлены на рис. 1.

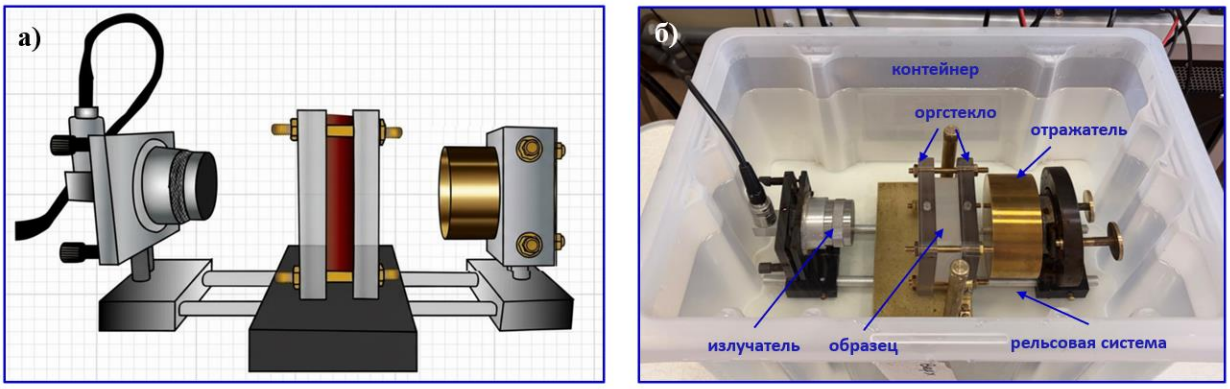


Рис. 1. (а) Схема экспериментальной установки для измерения скорости продольных звуковых волн, состоящая из излучателя, отражателя и образца в системе из плоскопараллельных оргстекол, погруженных в бассейн с водой (б). Фотография установки во время проведения измерений с ПВХ фантомом.

Использование отражателя позволяет контролировать взаимную параллельность элементов установки путем максимизации амплитуды принимаемого отраженного сигнала и, как следствие, обеспечивать нормальное падение УЗ импульса на все границы раздела. Сначала измерялось время t_0, за которое УЗ-импульс проходит расстояние от излучателя до отражателя и обратно в эталонной среде в отсутствие образца: $t_0 = 2L/c_0$, где L – расстояние между излучателем и отражателем, c_0 – скорость звука в воде. После проведения аналогичного измерения с добавлением образца вычислялось время задержки $\tau = t - t_0$, где t – время, за которое УЗ-импульс успевает вернуться к излучателю в системе с добавлением образца. Формула скорости продольной волны в образце:

$$c_l = \frac{2Hc_0}{2H + \tau c_0}, \qquad (1)$$

где H – толщина образца. Для учёта потерь, связанных с отражением от границ образца с оргстеклом, рассчитывалось произведение коэффициентов прохождения плоской акустической волны в системе без образца $T_{12}T_{21}$, и в системе с образцом $T_{23}T_{32}$. Для вычисления коэффициента затухания требовалось только их отношение T:

$$T = \frac{T_{23}T_{32}}{T_{12}T_{21}} = \frac{Z_3\left(Z_1 + Z_2\right)^2}{Z_1\left(Z_2 + Z_3\right)^2}, \qquad (2)$$

где $Z_1 = \rho_{воды}c_0$, $Z_2 = \rho_{оргстекла}c_{оргстекла}$, $Z_3 = \rho_{образца}c_l$ – акустические импедансы воды, оргстекла и образца, соответственно.

Формула (2) позволяет учесть потери, связанные с отражением от границ образца. Кроме указанных потерь, волна испытывает частотно-зависимое затухание в самом образце. Пусть S

и S_0 – спектральные амплитуды принимаемых сигналов на центральной частоте (1 МГц) при наличии образца и при его отсутствии, соответственно. Тогда имеет место соотношение $|S|=|S_0|T^2\exp[-(\alpha-\alpha_в)2H]$, где $\alpha_в$ – коэффициент затухания в эталонной жидкости (воде), который можно считать малым по сравнению с α. Отсюда величина коэффициента затухания находится как:

$$\alpha=\frac{1}{2H}\ln[T^2\frac{|S_0|}{|S|}] \qquad (3)$$

Модуль Юнга образцов измерялся методом эластографии сдвиговой волной, основанным на измерении скорости сдвиговых волн [6]. Измерения проводились на ультразвуковой системе Aplio i800 с использованием датчика SL15-4 (Canon Medical Systems, Japan).

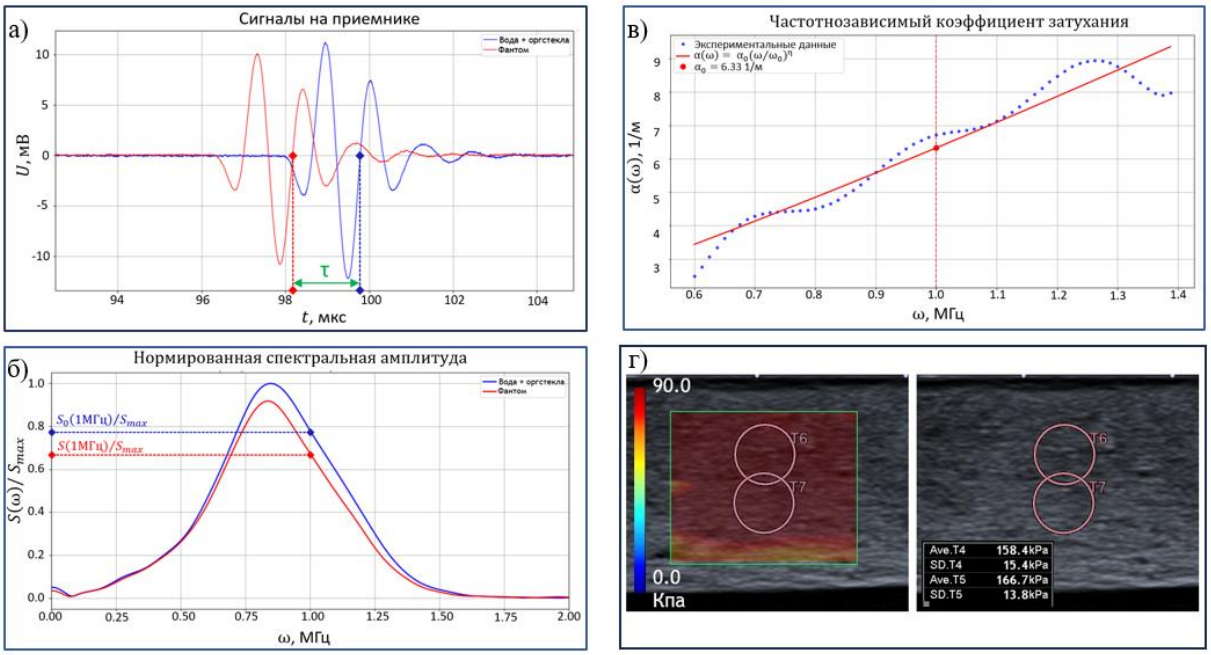


Рис. 2. Экспериментальные результаты, полученные для ПВХ пластизоля с примесью: (а) временные импульсные сигналы и (б) спектры сигналов в среде с образцом и без образца, (в) график частотно-зависимого коэффициента затухания, (г) измерение модуля Юнга образца методом эластографии сдвиговой волной.

Результаты

Характерные формы измеренных акустических сигналов, их спектры и частотно-зависимый коэффициент затухания, а также модуль Юнга представлены на рис. 2.

В таблице 1 представлены результаты измерений плотности ρ, скорости c_l, коэффициента затухания на частоте 1 МГц α_0 и модуля Юнга E для всех рассмотренных материалов. Как видно из полученных результатов, силиконовый фантом выделяется наибольшей плотностью, наименьшей скоростью звука и наибольшим коэффициентом затухания. Агарозный и полиакриламидный гели характеризуются низким затуханием.

Наиболее близкими к свойствам мягких биотканей человека оказались фантомы из полиакриламидного геля и пластизоля на основе поливинилхлорида – ПВХ-пластизоля. Значения для модулей Юнга в полиакриламидном геле и пластизоле с твердостью 1 ед. Шора больше, чем в здоровой человеческой печени, но могут соответствовать её патологическому состоянию, например циррозу. Пластизоль с твердостью 3 ед. Шора характеризуется затуханием, близким к тканям человеческой печени и жира, но существенно большей жесткостью. Говяжья печень близка по скорости звука и коэффициенту затухания к здоровой человеческой печени, но имеет большее значение модуля Юнга, характерное для фиброза второй степени в печени человека.

Таблица 1**. Характеристики фантомов**

	ρ, г/см³	c_l, м/с	α_0, 1/м	E, кПа
Силикон (рис. 1а)	1.086	1057	13	-
Агарозный гель (рис. 1б)	1.028	1495	0.4	-
Полиакриламидный гель (рис.1в)	1.000	1459	1.0	16
ПВХ с примесью, H = 2 см, 3 ед. Шора (рис. 1д)	0.999	1358	5	156
ПВХ без примеси, H = 2 см, 1 ед. Шора (рис. 1г)	0.975	1397	1.1	18
Говяжья печень (рис. 1е)	1.056	1582	6.3	7.9
Человеческий жир	0.910 [7]	1440 [8]	4.36 [7]	1.6 – 3 [8]
Человеческая печень	1.080 [7]	1586 [8]	6.9 [7]	2 – 6 [9]

Заключение

Разработана экспериментальная установка и методика измерения акустических параметров фантомов мягких тканей. Получены значения плотности, скорости продольных волн, коэффициента затухания на частоте 1 МГц и модуля Юнга для образцов на основе силикона, агарозы, полиакриламида, ПВХ-пластизоля с твёрдостью 1 и 3 ед. Шора, а также для ткани говяжьей печени *ex vivo*. Среди исследованных материалов наиболее близкими к свойствам мягких биотканей человека по совокупности параметров оказались полиакриламидный гель и ПВХ-пластизоль с твёрдостью 1 ед. Шора. Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ 25-12-00157.

Список литературы

1. *Хилл К., Бэмбер Дж., тер Хаар. Г.* Ультразвук в медицине: физические основы применения. Физматлит. М., 2008, С. 544.
2. *Lafon C., Zderic V., Noble M.L., Yuen J.C., Kaczkowski P.J., Sapozhnikov O.A., Chavrier F., Crum L.A., Vaezy S.* // Ultrasound in Medicine & Biology. 2005. **31,** N 10, P. 1383-1389.
3. *Maxwell A.D., Wang T.Y., Yuan L., Duryea A.P., Xu Z., Cain C.A. //* Ultrasound in Medicine & Biology. 2010. **36,** N 12. P. 2132-2143.
4. *Leonov D, Venidiktova D, Costa-Júnior JFS, Nasibullina A, Tarasova O, Pashinceva K, Vetsheva N, Bulgakova J, Kulberg N, Borsukov A, et al.* // Int J Comput Assist Radiol Surg. 2024, **19**, N 1, P. 151-161.
5. *Madsen E.L., Dong F., Frank G.R., Garra, B.S., Wear K.A., Wilson T., Zagzebski J.A., Miller H.L., Shung K.K., Wang S.H., et al.* // Journal of Ultrasound in Medicine. 1999. **18,** N 9. P. 615-631.
6. *Ophir J., Alam S.K., Garra B.S., Kallel F., Konofagou E.E., Krouskop T., Merritt C.R., Righetti R., Souchon R., Srinivasan S., et al.*// Journal of Medical Ultrasonics. 2002. **29**, N 4. P. 155-171.
7. *Baumgartner C., Hasgall P.A., Di Gennaro F., Neufeld E., Lloyd B., Gosselin M.C., Payne D., Klingenböck A., Kuster N.* // IT'IS Database for thermal and electromagnetic parameters of biological tissues Version 5.0. 2025.
8. *Alkhouli N., Mansfield J., Green E., Bell J., Knight B., Liversedge N., Tham J.C., Welbourn R., Shore A.C., Kos K., Winlove C.P.* // American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism. 2013. **305**, N 12, P. E1427-E1435.
9. *Ferraioli G., Barr R.G., Berzigotti A., Sporea I., Wong V.W.S., Reiberger T., Karlas T., Thiele M., Cardoso A.C., Ayonrinde O.T., et al.* // Ultrasound in Medicine & Biology. 2024. **50**, N 8. P. 1071-1087.

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39668

Использование акустической системы VERASONICS для задач ультразвуковой диагностики (эластография SWEI, SWD параметр, H-SCAN)

И.Ю. Демин, А.Е. Спивак

Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет имени Н. И. Лобачевского, радиофизический факультет, кафедра акустики.

Россия, 603950, Нижний Новгород, пр-т Гагарина, д. 23.

E-mail: demin@rf.unn.ru

Аннотация: На кафедре акустики ННГУ им. Н.И. Лобачевского на акустической системе Verasonics с открытой архитектурой реализован метод медицинской ультразвуковой диагностики эластография сдвиговой волной (SWEI). Данный метод был апробирован с помощью калиброванных фантом мягкой биологической ткани CIRS 049.

Представлены результаты реализации метода Shear Wave Dispersion (SWD) для оценки параметра дисперсии сдвиговых волн, который связан с вязкими свойствами мягких биологических тканей при диффузных заболеваниях печени, и приводится численный анализ результатов измерений фантома CIRS. Показано, что параметр SWD может служить дополнительным диагностическим биомаркером для описания вязких и упругих свойств мягких тканей

В последние годы в работах по ультразвуковым биомедицинским исследованиям активно обсуждается вопрос о частотной зависимости рассеивателей в различных мягких тканях. Традиционно принятые изображения B-Scan дают информацию о исследуемых эхо-сигналов в виде оттенков серого. Предлагаемый H-Scan является альтернативным методом, который производит классификацию рассеивателей в виде цветового кодирования изображения традиционного B-Scan. Описана теория численного построения H-Scan на основании данных обычного B-Scan, полученного на акустической системе Verasonics с использованием результаты обработки RF-данных сканированных фантомов CIRS.

Ключевые слова: медицинская ультразвуковая диагностика, Verasonics, эластография SWEI, SWD параметр, H-Scan

Utilization of the VERASONICS research system for ultrasound diagnostic applications (SWEI, SWD, H-SCAN)

I.Yu. Demin, A.E. Spivak

Department of Acoustics, Faculty of Radiophysics, Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

23 Gagarin Av., Nizhny Novgorod 603950, Russia.

E-mail: demin@rf.unn.ru

Abstract: At the Department of Acoustics of Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod (UNN), the Shear Wave Elastography (SWEI) medical ultrasound diagnostic method has been implemented on Verasonics research system. This method was validated using a calibrated CIRS 049 soft biological tissue phantom.

The results of implementing the Shear Wave Dispersion (SWD) method for evaluating the shear wave dispersion parameter, which is associated with the viscous properties of soft biological tissues in diffuse liver diseases, are presented. A numerical analysis of the measurement results obtained from the CIRS phantom is provided. It is shown that the SWD parameter can serve as an additional diagnostic biomarker for describing the viscous and elastic properties of soft tissues.

In recent years, the frequency dependence of scatterers in various soft tissues has been actively discussed in the field of ultrasound biomedical research. Conventionally acquired B-Scan images provide information about the received echo signals in shades of gray. The proposed H-Scan is an alternative method that performs scatterer classification through color encoding of the conventional B-Scan image. The theory of numerical H-Scan reconstruction based on conventional B-Scan data acquired with the Verasonics acoustic system is described, using processed RF data from scanned CIRS phantoms.

Keywords: medical ultrasound diagnostics, Verasonics, SWEI, SWD, H-Scan

PACS: 43.25.Zx

Введение

Ультразвуковая диагностика на сегодняшний день является важным инструментом для обнаружения и последующего лечения различного вида отклонений в организме, ярким примером которых могут послужить заболевания печени и онкологические процессы. В последних двух случаях мягкая биологическая ткань человека претерпевает серьезные изменения с точки зрения плотностных и вязкоупругих характеристик. В связи с этим в последние годы особое внимание уделяется реализации методов ультразвуковой диагностики, которые позволяют не только визуально отобразить состояние ткани, но и количественно ее охарактеризовать.

Ярким примером такого метода является эластография сдвиговой волной (Shear Wave

Elasticity Imaging – SWEI), который позволяет количественно отобразить упругие характеристики мягкой ткани. Однако данный метод не позволяет точно отобразить изменения, происходящие в организме, с точки зрения вязкостных характеристик.

Для решения данного вопроса был предложен метод оценки параметра дисперсии сдвиговых волн (Shear Wave Dispersion – SWD), который связан с вязкими свойствами мягких биологических тканей, что особенно важно при диффузных заболеваниях печени [1].

В биомедицине имеется давний вопрос ультразвукового исследования о частотной зависимости рассеивателей в различных тканях, органах и крови. Традиционно принятые изображения B-Scan дают информацию о исследуемых эхо-сигналов в виде оттенков серого. Предлагаемый H-Scan является альтернативным методом, который производит классификацию рассеивателей в виде цветового кодирования изображения традиционного B-Scan [2].

В данном докладе представлено краткое описание и реализация трех описанных выше методов на исследовательской ультразвуковой системе с открытой архитектурой Verasonics V-1 (Verasonics Inc., Кирклэнд, Вашингтон, США), а также их апробация с помощью калиброванного фантома мягкой биологической ткани CIRS 049 (Computerized Imaging Reference Systems, Inc., Норфолк, Вирджиния, США).

1 Метод оценки упругих характеристик мягких тканей эластография сдвиговой волной (SWEI)

Метод Shear Wave Elasticity Imaging позволяет на основе измерения скорости сдвиговых волн оценить упругие свойства мягких биологических тканей, а именно модули сдвига и Юнга [3]. Сдвиговая волна возбуждается мощной сфокусированной волной в толще образца. В результате действия на среду радиационной силы в среде начинает распространятся сдвиговая волна. Целью процесса регистрации является смещения частичек среды, обозначаемой как $\xi(t)$. Регистрация смещения производится ультразвуковым методом. На основе построения линейной зависимости максимумов смещения частиц среды от времени вычисляется скорость сдвиговой волны, которая потом пересчитывается в модуль Юнга, как основной требуемый параметр для определения упругости:

Реализованный метод SWEI был апробирован с использованием калиброванного фантома мягкой биологической ткани CIRS 049, содержащего в себе сферы разного радиуса с определенным значением модуля Юнга. Фантом заполнен твердым эластичным гидрогелем Zerdine. Результаты были сравнены с табличными, которые приводит производитель.

Таблица 1

Сравнение результатов измерения фантома CIRS MODEL 049 на системе Verasonics с паспортными данными

Type	Verasonics, SWEI		Данные CIRS
	V, м/с	E, кПа	E, кПа
Background	2,63	20,72	25
I	1,46	6,36	8
II	1,83	10,02	14
III	3,25	31,69	45

2 Метод оценки параметра дисперсии сдвиговых волн (SWD)

В данной работе реализован метод Shear Wave Dispersion (SWD) для оценки параметра дисперсии сдвиговых волн [4]. Алгоритм расчет параметра SWD можно разбить на несколько этапов. Сначала происходит получение смещения частиц ткани, вызванного сдвиговой волной, в нескольких точках регистрации данных. Далее смещение в каждой точке преобразуется из временной области в частотную посредством преобразования Фурье для оценки изменения фазы в сдвиговой волне на нескольких частотах. Скорость сдвиговой волны рассчитывается по формуле (1)

$$c_s(\omega) = \omega \frac{\Delta L}{\Delta \phi(\omega)}, \qquad (1)$$

где $\Delta \phi(\omega)$ – изменение фазы на пройденном расстоянии ΔL между двумя точками измерения в направлении распространения сдвиговой волны. По углу наклона скоростей определяется значение параметра SWD. Программная реализация метода SWD была использована при анализе вязкоупругих характеристик калиброванного полимерного фантома CIRS.

В [12], с использованием ультразвуковой экспертной системы Canon Aplio i800 (Canon Medical Systems, Япония), были измерены вязкоупругие свойства (скорость сдвиговой волны и параметр SWD) фантомов. В этом исследовании использовались фантом фиброза печени с– модель 039 CIRS. Фантом заполнен твердым эластичным гидрогелем Zerdine. В таблице 2 приведено сопоставление описанных выше физических измерений фантома 039 CIRS с результатами численного моделирования по определению параметра SWD (значения скоростей сдвиговых волн в фантоме 049 CIRS измерены системой Verasonics для различных типов сфер).

Одним из выводов [5] является то, что в целом параметр SWD показал в два-три раза большую изменчивость, чем скорость сдвиговой волны. Это же подтверждается и результатом численного определения параметра SWD, который более изменчив чем упругие свойства различных сфер фантома 049 CIRS, что будет служить дополнительным диагностическим биомаркером для описания вязких и упругих свойств мягких тканей.

Таблица 2

Сравнение параметров SWD для фантомов CIRS 039 и 049

Фантом 039 CIRS	Скорость сдвиговой волны (м/с)	Параметр SWD сдвиговой волны (м/с/кГц)	Фантом 049 CIRS	Параметр SWD – данные настоящего исследования (м/с/кГц)
P1	0.83	7.05	Сфера 1	4,65 (скорость 1,46 м/с)
P2	1.47	10.38	Сфера 2	8,41 (скорость 1,83 м/с)
P3	2.46	18.65	Среда	17,85 (скорость 2,63 м/с)
P4	3.57	26.07	Сфера 3	24,33 (скорость 3,25 м/с)

3 Идентификация рассеяния и отражения в изображениях H-scan

Метод H-scan — это способ ультразвуковой визуализации, классифицирующий типы рассеивателей в мягких тканях на основе частотных характеристик эхо-сигналов. В отличие от традиционного B-скана, использующего серую шкалу, H-scan применяет цветовое кодирование для различения структур. Теоретически метод опирается на связь между профилем акустического импеданса ткани и формой отражённого импульса. Плоская граница (зеркальное отражение) создаёт эхо, пропорциональное исходному импульсу $p(t)$; тонкий слой с высоким импедансом — первой производной dp/dt; облако мелких (релеевских) рассеивателей — второй производной d^2p/dt^2. Для идентификации этих классов используется семейство взвешенных по Гауссу полиномов Эрмита: $GH_4(t)$ соответствует отражению от границы, $GH_5(t)$ — тонкому слою, $GH_6(t)$ — мелким рассеивателям. Обработка включает параллельную свёртку эхо-сигнала с этими тремя функциями. В каждый момент времени выбирается максимальный отклик, который отображается цветом: красный (для GH_4), зелёный (GH_5) или синий (GH_6). Это позволяет визуально разделить вклады различных тканевых структур [6].

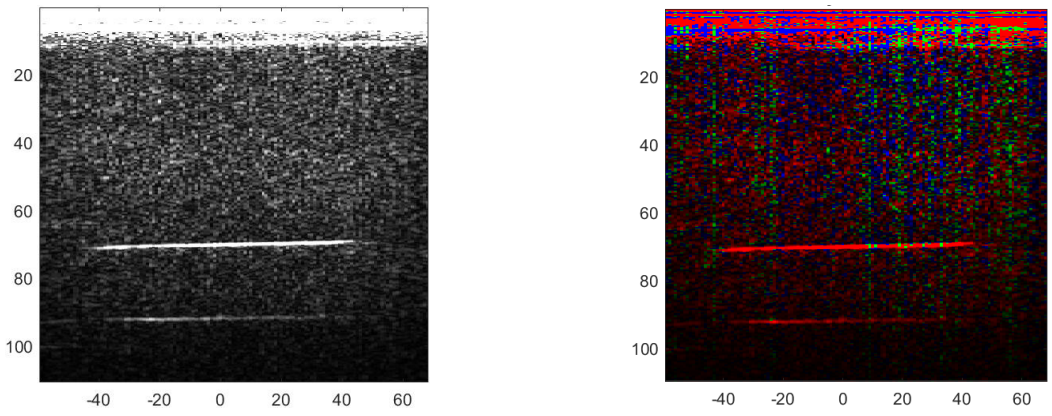


Рис. 1 Фантом цилиндра первого типа. Слева обычное изображение B-скана, справа – цветовое кодирование, полученное в результате свертки Эрмита.

Для реализации метода H-скан в среде программирования MATLAB была разработана программа, которая, получая на вход файл RF-данных, производит обработку и визуализацию B- и H-сканов. Файлы RF-данных были получены с помощью акустической системы Verasonics,

использовался линейный преобразователь с центральной частотой 5 МГц с гауссовой обработкой при приеме и передаче и частотой дискретизации 50 МГц.

На рис. 1 отображены B- и H-скан фантома цилиндра CIRS Model 049 – Cylindrical в продольном сечении. Слева обычное изображение B-скана, справа – цветовое кодирование, полученное в результате свертки Эрмита. Из изображения H-скана видно, что цилиндр имеет обычные зеркальные границы (красный цвет). Также видно, что среда фантома состоит из множества различных типов рассеивателей и отражателей.

Заключение

Приведено описание и результаты апробация метода эластографии сдвиговой волной (SWEI), реализованный на акустической системе Verasonics. Реализован метод Shear Wave Dispersion (SWD) для оценки параметра дисперсии сдвиговых волн и представлены результаты вычисления параметра дисперсии сдвиговой волны SWD для фантомов CIRS. Сравнение с известными данными для фантома с изотропной эластичностью показало, что параметр SWD характеризуется в два-три раза большей изменчивостью, чем скорость сдвиговой волны. Приведено описание метода H-Scan и представлены результаты обработки RF-данных реальных сканированных объектов и их интерпретация.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSWR-2026-0017).

Список литературы

1. *Bae MS, Kim HY, Oh H, Seo BK.* Clinical applications of shear wave dispersion imaging for breast lesions: a pictorial essay. // Ultrasonography. 2023. V. 42 N. 4. P.589
2. *Parker K.J.*. The H-Scan Format for Classification of Ultrasound Scattering // OMICS J Radiol 2016, 5:5.
3. *Демин И. Ю., Лисин А. А., Спивак А. Е., Шнейдман Д. Д.* Эластография сдвиговой волной: физическое моделирование на акустической системе Verasonics и численное моделирование в toolbox k-Wave // Учен. зап. физ. фак-та Моск. ун-та. № 6. 1860101 С. 1-5, 2018.
4. *Sugimoto K., Moriyasu F., Oshiro H., Takeuchi H., Yoshimasu Yu., Kasai Y., Itoi T.* Clinical utilization of shear wave dispersion imaging in diffuse liver disease // Ultrasonography. 2020. V. 39. N. 1. P. 3.
5. *Martiartu K., Nambiar H., Kirchner I., Paverd C., Cester D., Frauenfelder T., Ruby L., Rominger M.* Sources of Variability in Shear Wave Speed and Dispersion Quantification with Ultrasound Elastography: A Phantom Study // Ultrasound in Med. & Biol. 2021. V. 47. N. 12. P. 3529.
6. *Parker K.J., Baek J.* Fine-tuning the H-scan for discriminating changes in tissue scatterers // Biomed. Phys. Eng. Express. 2020. 6 045012

УДК: 534.213. DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39669

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ И СКОРОСТИ В РАСЧЕТАХ ПРОХОЖДЕНИЯ ФОКУСИРОВАННОГО УЛЬТРАЗВУКА ЧЕРЕЗ ЧЕРЕП

Крохмаль А.А.[1)], Росницкий П.Б.[1,2)], Цысарь С.А.[1,2)], Хохлова В.А.[1)], Сапожников О.А.[1)]

[1)] Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет, г. Москва;

[2)] Федеральный центр мозга и нейротехнологий ФМБВ России, Москва;

Тел./Факс: +7 (495) 939-29-52; E-mail: krokhmalaa@my.msu.ru

При терапии фокусированным ультразвуком мозга контроль осуществляется по росту температуры в фокусе с помощью МРТ. В условиях распространения терапии низкоинтенсивным ультразвуком и перехода к методам наведения пучка на основе нейронавигации, где контроль опирается исключительно на численные расчёты, ключевыми становятся точность и скорость моделирования.

Задача о прохождении ультразвука через неоднородный череп требует аккуратного расчета. В большинстве работ рекомендуется использовать 6-9 точек на длину волны в численной модели для задания источника с изогнутой поверхностью, что становится ограничением быстроты расчетов. Нами исследована возможность увеличения шага по сетке при сохранении точности.

Фокусированный источник с диаметром апертуры и фокусным расстоянием 64 мм на частоте 1 МГц задавался на плоскости и рассчитывался с помощью интеграла Рэлея с применением численного пакета xDDx. Проведена серия численных расчетов через 2 образца черепа с шагом от 2 до 9 точек на длину волны. Акустические параметры среды задавались на основе снимков КТ и интерполировались в соответствии с исследуемым шагом.

Показано, что уже для шага 3.75 точек на длину волны точность максимальной амплитуды давления составляет 3 %, точность среднеквадратичной ошибки по всей расчетной области составляет 9 %, а коэффициент Дайса для оценки совпадения области фокального пятна составляет 92 %. Таким образом, предложенный метод позволяет на порядок ускорить расчет акустического поля внутри черепа.

Ключевые слова: численные расчеты, медицинский ультразвук, транскраниальный фокусированный ультразвук, акустическая голография, акустика неоднородных сред

ENSURING ACCURACY AND SPEED IN CALCULATIONS OF FOCUSED ULTRASOUND PROPAGATION THROUGH THE SKULL

Krokhmal A.A. [1)], Rosnitskiy P.B. [1,2)], Tsysar S.A.[1,2)], Khokhlova V.A.[1)], Sapozhnikov O.A. [1)]

[1)] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Moscow;

[2)] Federal Center of Brain Research and Neurotechnologies of the FMBA of Russia, Moscow;

Tel./Fax: +7 (495) 939-29-52;

E-mail: krokhmalaa@my.msu.ru

In focused ultrasound therapy of the brain, monitoring is performed based on temperature rise at the focus using MRI. In the context of the propagation of low-intensity ultrasound therapy and the transition to beam guidance methods based on neuronavigation, where monitoring relies exclusively on numerical calculations, the accuracy and speed of modeling become crucial.

The problem of ultrasound propagation through the inhomogeneous skull requires careful calculation. Most studies recommend using 6–9 points per wavelength in the numerical model to

define a source with a curved surface, which imposes a limitation on the speed of calculations. We investigated the possibility of increasing the grid step while maintaining accuracy.

A focused source with an aperture diameter and focal length of 64 mm at a frequency of 1 MHz was defined on a plane and calculated using the Rayleigh integral with the numerical package xDDx. A series of numerical calculations were performed through two skull samples with a step ranging from 2 to 9 points per wavelength. The acoustic parameters of the medium were defined based on CT images and interpolated according to the step under study.

It was shown that with a step of 3.75 points per wavelength, the accuracy of the maximum pressure amplitude is 3%, the root-mean-square error over the entire computational domain is 9%, and the Dice coefficient for assessing the overlap of the focal spot region is 92%. Thus, the proposed method allows accelerating the calculation of the acoustic field inside the skull by an order of magnitude.
Keywords: numerical calculations, medical ultrasound, transcranial focused ultrasound, acoustic holography, acoustics of inhomogeneous media.

PACS: 43.35.Bf, 43.20.+g

Введение

В условиях распространения терапии низкоинтенсивным ультразвуком и перехода к методам наведения пучка на основе нейронавигации, когда контроль опирается исключительно на численные расчёты, ключевыми становятся точность и скорость моделирования. Однако часто численные расчеты длительны и не могут проводиться в режиме реального времени.

Задача о прохождении ультразвука через неоднородный череп требует аккуратного моделирования, учитывающего сложные акустические свойства костной ткани [1]. В существующих работах для моделирования транскраниального поля применяют псевдоспектральный метод, реализованный в пакете программирования k-Wave, который уже продемонстрировал свою надежность [2, 3]. Простой способ моделирования неплоского излучателя заключается в задании колеблющейся изогнутой поверхности. При этом возникают численные артефакты, связанные с тем, что каждый воксель соответствует в действительности разной площади излучения в зависимости от ориентации источника и сетки. В большинстве работ для задания источника с изогнутой поверхностью рекомендуется использовать достаточно мелкий шаг — 6–9 точек на длину волны в численной модели [2], что позволяет минимизировать искажения амплитуды и поля [3]. Однако такое требование становится серьезным ограничением для быстроты расчетов.

В связи с этим нами исследована возможность увеличения шага по сетке при сохранении точности моделирования. Впервые в работах [4, 5] был предложен подход, основанный на пересчете поля фокусирующего излучателя со сферически вогнутой поверхностью на плоскость с помощью интеграла Рэлея и корректном задании массовых

источников в узлах сетки. Нами была исследована точность численных расчётов для разных параметров сетки при сохранении высокой скорости вычислений.

1 Численная модель

Для сравнения точности расчетов были рассмотрены две численные модели фокусирующего одноэлементного излучателя радиуса кривизны F = 63.2 мм и диаметра апертуры A = 64 мм, излучающего квазигармонический сигнал на частоте 1 МГц. Предполагалось, что поверхность излучателя колеблется синфазно с колебательной скоростью 1 м/с. Первая модель, реализованная с помощью встроенных функций k-Wave, представляла собой совокупность точечных источников на изогнутой поверхности, причем источники расположены в узлах, наиболее близких к сферической поверхности заданной геометрии (рис. 1, а, в). Колебания в каждой точке характеризовались одинаковой амплитудой и фазой. Вторая модель представляла собой совокупность источников на плоскости, проходящей через начало излучателя параллельно направлению распространения пучка (рис. 1, б, в). Амплитуда и фаза точечных источников была рассчитана с помощью интеграла Рэлея в пакете численного моделирования xDDx [6]. Принцип расчета был следующим: сначала с помощью аналитической функции было рассчитано поле синфазно колеблющихся источников, находящихся на сферической поверхности с точными значениями координат, на плоскости, проходящей перпендикулярно направлению распространения пучка, на расстоянии F\2. Затем, также с помощью интеграла Рэлея, был произведен расчет поля в обратном направлении на плоскости в начале координат. Итоговый источник был рассчитан на такой расчетной сетке, которая в дальнейшем использовалась для моделирования прохождения ультразвукового пучка через череп.

В качестве моделей черепа использовались 2 снимка компьютерной томографии, предоставленные МНОИ МГУ. Черепа имели показатель SDR (skull density ratio), характеризующий степень прохождения ультразвукового пучка, равный 0.43 и 0.6, соответствующий низкой и высокой степени акустической «прозрачности» [7]. Значения рентгеновской плотности из компьютерной томограммы преобразовывались в значения плотности и скорости звука с помощью линейных преобразований [1], затем черепа сегментировались по пороговому значению 1250 кг/м^3. Коэффициент затухания кости черепа был задан однородным по всему объему кости и равным 16.6 дБ/см/МГц. Среда вокруг черепа соответствовала непоглощающей воде с плотностью 1000 кг/м^3 и скоростью звука 1500 м/с.

Шаг по сетке варьировался от 2 до 8 точек на длину волны в воде, за наиболее точный результат принимался результат расчёта поля при задании плоского источника на сетке с минимальным шагом (8 точек на длину волны). Для устойчивости численной схемы выбирался максимально возможный CFL от 0.11 до 0.3 для самого мелкого и самого крупного шага по

сетке, соответственно. Оценивалась сходимость расчетов по сетке исходя из максимальной амплитуды давления в фокусе, относительной среднеквадратичной ошибки по всей области расчета L2 и коэффициента Дайса (описывающего геометрическое совпадение области фокального пятна, определяемого по порогу -6 дБ).

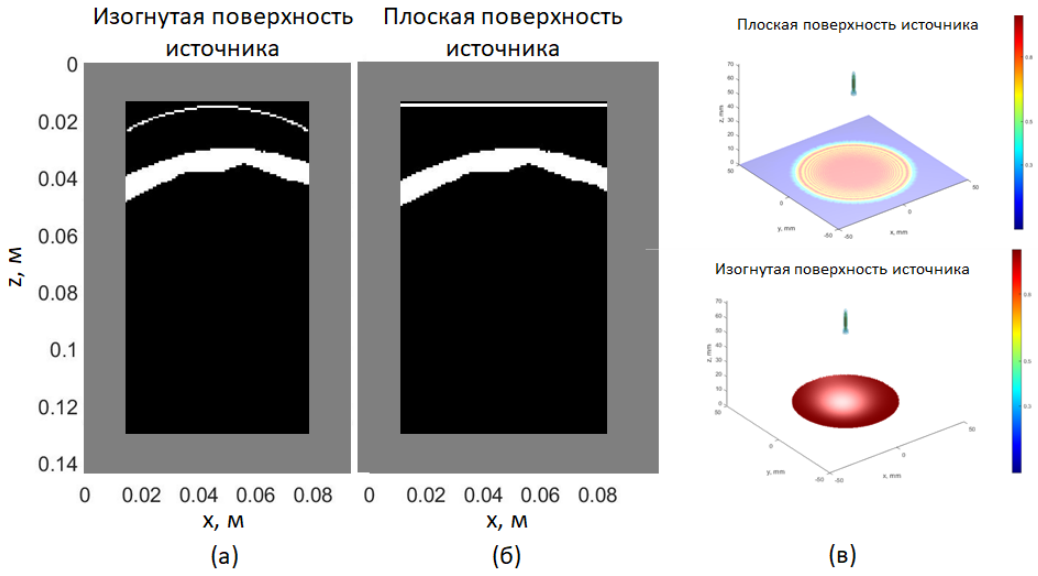


Рис. 1. Схема численного расчета транскраниального поля с источниками на изогнутой поверхности (а) и на плоскости (б). Серым цветом показана область PML, в центре – элемент черепа.

2 Проверка точности модели излучателя в однородной среде

Для проверки правильности задания источников обоими способами, был проведен расчет поля излучателя в воде, и результаты были сравнены с аналитическим решением интеграла Рэлея для поля фокусирующего источника на оси, описываемого формулой О 'Нила. Результаты показаны на рис. 2. Как видно из графиков, ошибка в максимальном давлении для изогнутого источника падает с уменьшением пространственного шага численной сетки, однако не уменьшается ниже чем 10 % (рис. 2, а). Это говорит о том, что для любых численных расчетов с источниками криволинейной геометрии, такой способ задания приведет к численным ошибкам в амплитуде. Для определения действительной амплитуды давления после прохождения через череп нужно будет нормировать результат: домножать на отношение расчетного давление в фокусе в свободном поле на аналогичной сетке и измеренное (либо рассчитанное аналитически) давление в фокусе. При этом, для плоского источника уже для шага 3 точки на длину волны ошибка в определении максимального давления составляет менее 1 % (рис. 2, а), и никакая дополнительная нормировка не требуется.

Также была рассчитана среднеквадратичная ошибка L2 для источника, заданного на изогнутой поверхности (рис. 2, б). Если нормировка поля была осуществлена, то точность численных расчетов оказывается вполне приемлемой, начиная с шага по сетке 3.75 точек на длину волны (L2 < 10%).

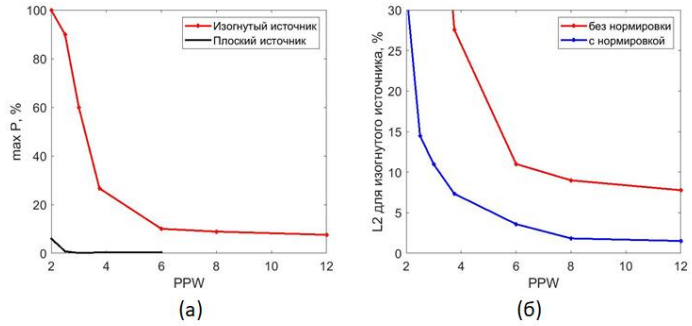


Рис. 2. Оценка точности численного расчета двух типов источников в свободном поле (в воде)

3 Результаты расчета прохождения пучка через череп

Были рассчитаны акустические поля фокусированного пучка, проходящего через 2 образца черепа для двух исследуемых моделей источников в диапазоне шагов по сетке от 2 до 8 точек на длину волны (PPW). Анализировались амплитуда максимального давления и геометрия фокального пятна (которое определялось по падению уровня давления на 6 дБ от максимума). Рассчитывались отличие максимального давления, среднеквадратичное отклонение L2 и коэффициент Дайса для каждого шага по сравнению с моделью с самым мелким шагом (8 точек на длину волны). Результаты показаны на рис. 3.

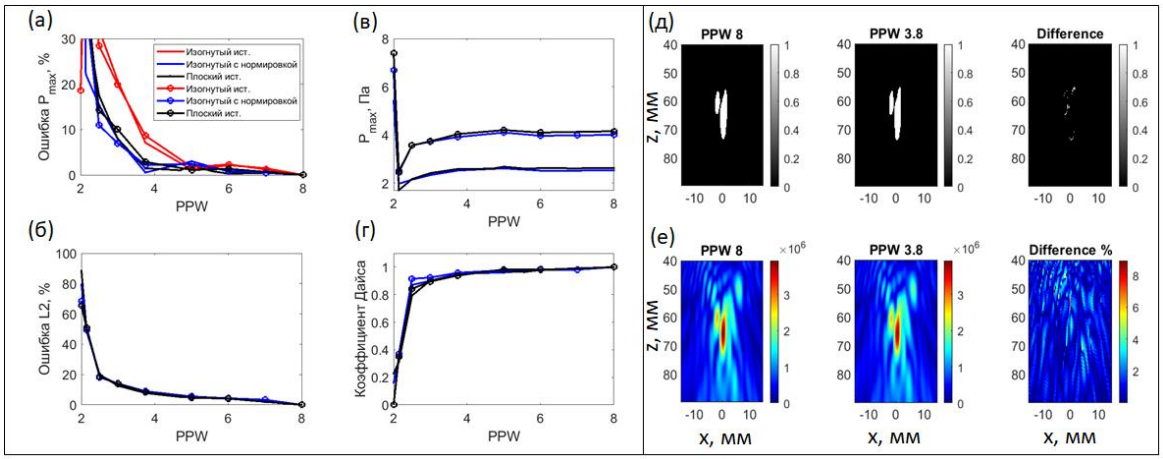


Рис. 3. (а – г) Сходимость метрик при увеличении точек на длину волны (PPW) в расчетной сетке, линии с маркерами и без маркеров соответствуют моделям черепов с SDR 0.6 и 0.43, соответственно; (д, е) – сравнение фокального пятна и картины поля амплитуды давления для плоского источника при пространственном шаге 3.75 и 8 точках на длину волны.

Ошибка максимального давления для модели изогнутого источника без предварительной нормировки амплитуды на результаты расчета в свободном поле убывает гораздо медленнее с уменьшением шага, чем у модели изогнутого источника с нормировкой и чем у плоской модели (рис. 3, а). При этом, в случае нормировки, сходимость максимума давления, метрики L2 и коэффициента Дайса оказывается практически идентичной для обоих типов задания излучателя (рис. 3, б, в, г). Уже начиная с шага более 3 точек на длину волны (рассматривалось значение 3.75), ошибка в определении максимальной амплитуды давления составляет 3 %, L2 составляет 9 %, а коэффициент Дайса 92 %. Данная точность

является приемлемой для клинических приложений (рис. 3 д, е) и позволяет на порядок ускорить расчет акустического поля внутри черепа по сравнению с принятыми подходами.

Заключение

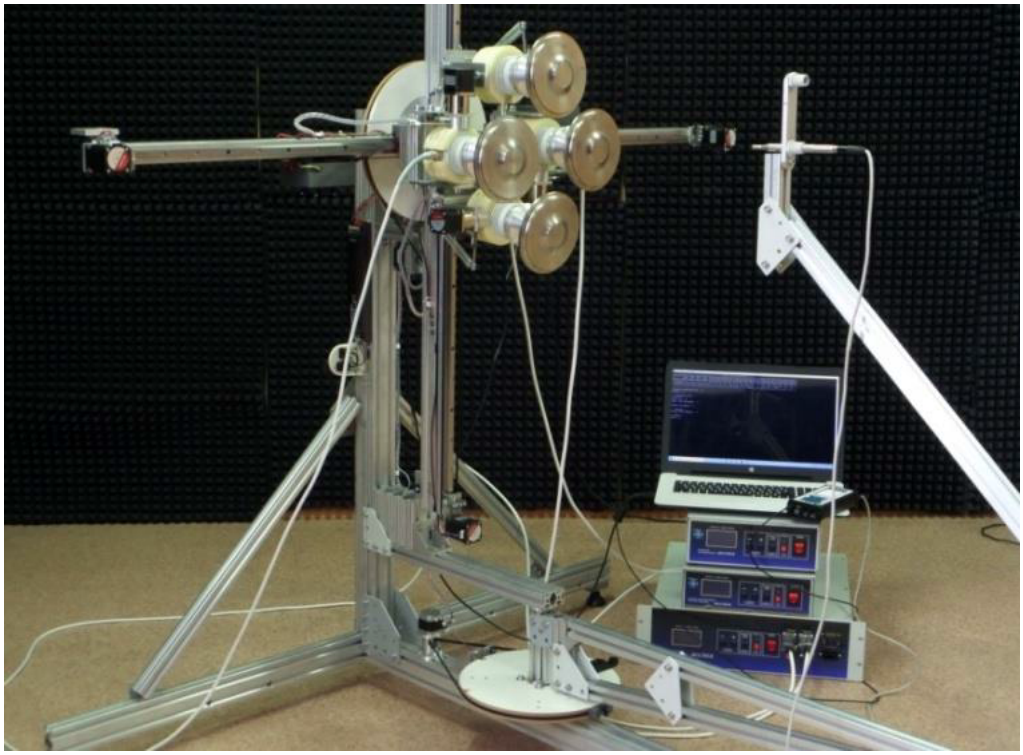
В работе продемонстрировано, что для точных расчетов транскраниального ультразвукового поля достаточно пространственного шага численной модели от 3 точек на длину волны. Для обеспечения точности результатов необходимо либо задавать источник на плоскости, что возможно для излучателя любой формы пересчетом поля с помощью интеграла Рэлея, либо нормировать результат расчетов для криволинейного источника на отношение расчетного и аналитического пика давления в свободном поле, что не всегда подходит в случае излучателя нестандартной формы. Работа выполнена в рамках темы госзадания.

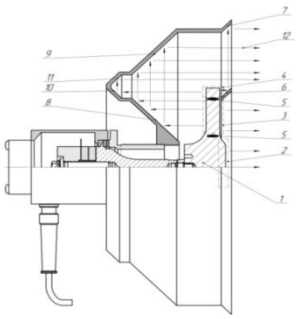
Список литературы

1. *Krokhmal A., Simcock I.C., Treeby B.E., Martin E*. A comparative study of experimental and simulated ultrasound beam propagation through cranial bones. // Phys. Med. Biol. 2025. 70, N 2. P. 025007.
2. *Robertson J.L., Cox B.T., Jaros J., Treeby B.E.* Accurate simulation of transcranial ultrasound propagation for ultrasonic neuromodulation and stimulation. // J. Acoust. Soc. Am. 2017. 141, N 3. P. 1726.
3. *Robertson J., Martin E., Cox B., Treeby B.E.* Sensitivity of simulated transcranial ultrasound fields to acoustic medium property maps. // Phys. Med. Biol. 2017. 62, N 7. P. 2559.
4. *Rosnitskiy P.B., Khokhlova T.D., Schade G.R., Sapozhnikov O.A., Khokhlova V.A.* Treatment Planning and Aberration Correction Algorithm for HIFU Ablation of Renal Tumors. // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. 2024. Vol. 71. No. 3. P. 341-353.
5. *Rosnitskiy P.B., Yuldashev P.V., Sapozhnikov O.A., Gavrilov L.R., Khokhlova V.A.* Simulation of nonlinear trans-skull focusing and formation of shocks in brain using a fully populated ultrasound array with aberration correction. // J. Acoust. Soc. Am. 2019. Vol. 146. No. 3. P. 1786–1798.
6. *Rosnitskiy P.B., Sapozhnikov O.A., Khokhlova V.A., Kreider W., Tsysar S.A., Thomas G.P., Contreras K., Khokhlova T.D*. xDDx: A numerical toolbox for ultrasound transducer characterization and design with acoustic holography. // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. 2025.
7. *Sakharova G., Krokhmal A., Galimova R., Khatmullina A., Nabiullina D., Buzaev I., Avzaletdinova D., Chupova D., Khokhlova V.* The use of alendronate to enhance transcranial transmission of focused ultrasound for successful ablations in brain. // Ultrasonics. 2025. P. 107796.

Назад к содержанию секции

СЕКЦИЯ УЛЬТРАЗВУК И УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ







назад к Содержанию

СОДЕРЖАНИЕ СЕКЦИИ УЛЬТРАЗВУК И УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

1. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ АППАРАТУРЫ НА МАГНИТОСТРИКЦИОННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ
Рухман А.А., Задорожный В.С., Рухман Е.П.....1120

2. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ ДРЕВЕСИНЫ ПОСЛЕ ДЛИТЕЛЬНОГО ХРАНЕНИЯ
Вьюгинова А.А., Вьюгинов С.Н., Леонтьев Л.Л., Новик А.А. 1126

3. УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ОБЪЕМНОЙ МИКРОСТРУКТУРЫ УГЛЕПЛАСТИКОВ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ ИЗГИБНЫХ НАГРУЗКАХ
Володарский А.Б., Мороков Е.С 1134

4. РАЗВИТИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СВАРКИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ИЗДЕЛИЙ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ
Хмелев В.Н., Барсуков Р.В., Нестеров В.А., Генне Д.В., Цхе А.В. 1135

5. РЕАЛИЗАЦИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО РАСПЫЛЕНИЯ
Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Терентьев С.А. 1143

6. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В ВОЗДУХЕ ДЛЯ СОЗДАНИЯ МОЩНОЙ МНОГОЭЛЕМЕНТНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ
Лапина А.В., Цысарь С.А., Росницкий П.Б., Сапожников О.А. 1150

7. ИЗЛУЧАТЕЛИ ИЗГИБНОГО ТИПА ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ В ГАЗОВЫХ СРЕДАХ
Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Цыганок С.Н. 1152

8. УЛЬТРАЗВУКОВОЕ РАЗРУШЕНИЕ ДЫМА
Хмелев В.Н, Шалунов А.В., Цыганок С.Н. 1160

9. РЕАЛИЗАЦИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ДЛЯ СУШКИ МАТЕРИАЛОВ
Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Терентьев С.А. 1168

10. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЧАСТОТЫ И АМПЛИТУДЫ ПУЛЬСАЦИЙ ГАЗОВОГО ПОТОКА НА ПРОЦЕСС СУШКИ СФЕРИЧЕСКОЙ ПОРИСТОЙ ЧАСТИЦЫ
Зайнутдинова Д.А., Павлов Г.И., Горбунова О.А., Теляшов Д.А. 1175

11. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ НИЗКОЧАСТОТНОГО ТРЕХСЛОЙНОГО ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ ГЕОФИЗИЧЕСКОГО КАРОТАЖА НЕФТЯНЫХ СКВАЖИН
Наседкин А.В., Наседкина А.А., Павленко М.В., Рыбянец А.Н.....1181

12. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УПРУГИХ СВОЙСТВ ОБРАЗЦОВ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ПО ХАРАКТЕРИСТИКАМ УПРУГИХ ВОЛН
Голуб М.В., Канищев К.К., Арсенов М.А., Еремин А.А., Ханазарян А.Д., Дорошенко О.В., Шилько С.В., Панаи А., Румянцев И.А., Емельянов В.А.....1187

13. ЧИСЛЕННЫЕ И НАТУРНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ДИСПЕРСИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НОРМАЛЬНЫХ УПРУГИХ ВОЛН В ПРОТЯЖЕННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ СЛОЖНОГО СЕЧЕНИЯ
Емельянов В.А., Румянцев И.А., Еремин А.А., Панаи А.....1193

14. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ СИСТЕМЫ «ПЬЕЗОАКТУАТОР – СЛОИСТЫЙ АНИЗОТРОПНЫЙ ВОЛНОВОД»
Варелджан М.В., Еремин А.А., Глушков Е.В., Глушкова Н.В.....1199

15. ИССЛЕДОВАНИЕ УПРУГИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД МЕТОДОМ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ
Краснова М.А., Белобородов Д.Е. 1206

16. ФИЗИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО СКЛЕИВАНИЯ
Пугачев С.И., Рытов Е.Ю.....1211

17. УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ИНТЕНСИФИКАЦИЯ МАССООБМЕНА В ГАЗОЖИДКОСТНЫХ СИСТЕМАХ
Барсуков А.Р., Голых Р.Н., Хмелёв В.Н., Маняхин И.А. 1217

18. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ СФЕРИЧЕСКИХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ИЗ ПОРИСТОЙ И СПЛОШНОЙ ПЬЕЗОКЕРАМИК
Леднов А.С., Наседкин А.В., Швецов И.А., Рыбянец А.Н.....1224

19. ИЗМЕРЕНИЕ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ВОЗДУШНОГО УЛЬТРАЗВУКА, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В КАЧЕСТВЕ ЭЛЕМЕНТОВ АНТЕННЫХ РЕШЁТОК
Петров Е.А., Лапина А.В., Цысарь С.А., Гогмачадзе Н., Сапожников О.А. 1230

20. ОБЗОР ПРИМЕНЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ДОБЫЧИ НЕФТИ В СЛОЖНЫХ КОЛЛЕКТОРАХ
Дамдинов Б.Б., Пригожих В.А.....1232

21. АНОМАЛЬНАЯ УПРУГАЯ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ ДИСПЕРСИЯ В ПОРИСТОЙ ПЬЕЗОКЕРАМИКЕ
Швецова Н.А., Луговая М.А., Швецов И.А., Колпачева Н.А., Рыбянец А.Н. 1236

22. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ФОКУСИРУЮЩИХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ
Луговая М.А., Швецов И.А., Петрова Е.И., Константинова М.Г., Рыбянец А.Н.....1244

УДК: 621.3 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39670

Перспективы развития ультразвуковой аппаратуры на магнитострикционных преобразователях

А.А. Рухман[1,a*], В.С. Задорожный В.С.[2,b], Рухман Е.П.[2,c]

[1.] ООО «Ультразвыковые генераторы», Москва, Россия
[2.] ООО «Ультра-Резонанс», Екатеринбург, Россия
E-mail: [a] aruhman@yandex.ru [b] zadorozhniy.vasiliy@yandex.ru [c] ruhman.e@yandex.ru

Аннотация: В статье производится обзор существующей и применяемой более 65лет ультразвуковой аппаратуры (УЗА) на магнитострикционных преобразователях (ПМС). Одна из особенностей ПМС заключается в их большой массивности, а, значит, в существенной реактивной энергии, запасаемой в резонансном режиме. При изменении акустической нагрузки ПМС переходит из режима вынужденных колебаний (двигательного) в режим свободных колебаний, сопровождающийся генерацией ЭДС в питающей цепи (генераторный); поэтому ультразвуковой генератор (УЗГ) должен обеспечивать рекуперацию энергии, генерируемой ПМС, и иметь встроенную защиту выходных каскадов от перенапряжения. Также УЗГ должен автоматически подстраивать частоту в режимах с низкой добротностью ПМС и при смещении резонансной частоты при изменении параметров среды (плотность, температура, давление, содержание газа и т.п.). Многие производства требуют установки УЗГ и ПМС на значительном удалении друг от друга. При этом увеличиваются потери мощности и проявляются волновые свойства кабеля. Для снижения электрических потерь, упрощения конструкции УЗГ (отказ от блоков подмагничивания) разработаны ПМС на постоянных магнитах. Разработанная аналоговая система управления УЗГ позволяет осуществлять двухстороннюю связь системы управления УЗГ с цеховой АСУТП и индицировать основные параметры режима работы генератора на его мониторе. Эти технические решения позволили выйти на разработку нового поколения УЗА, произвести подготовку крупносерийного производства УЗА, обеспечивающего ответственные производства дешевыми и надежными УЗГ и ПМС. В этом направлении продолжаются интенсивные НИОКР.

Ключевые слова: ультразвуковая аппаратура, ультразвуковой генератор, магнитострикционный преобразователь подмагничиваемый постоянными магнитами, УЗГ, ПМС.

Ultrasonic equipment using magnetostrictive transducers development prospects

A.A. Ruhman[1,a], V.S. Zadorozhny[2,b], E.P. Ruhman[2,c]

[1.] Ltd «Ultrasonic generators», Moscow, Russia
[2.] Ltd «Ultra-Rezonans», Ekaterinburg, Russia
E-mail: [a] aruhman@yandex.ru [b] zadorozhniy.vasiliy@yandex.ru [c] ruhman.e@yandex.ru

Annotation: In this article we present an overlook of ultrasonic equipment (USE) incorporating magnetostrictic transducers (MSTs), existing and being in use for over 65 years. One of the features of magnetostrictic transducers is their large mass, and, therefore, high reactive energy accumulated at the resonance. With acoustic load variance the MST mode can change from forced to free oscillation, producing high-voltage EMF in power supply circuits, thus ultrasound generator (USG) must be capable to recuperate the MST reactive energy and have an overvoltage protection of its output. USG must also be capable to automatically adjust the output frequency in low Q-factor modes of MST operation and within resonance frequency shifts caused by environment parameters change (density, temperature, pressure, gas content etc.). In many installations USG and MST must be separated by a large distance. The connection cable in this case causes the power loss increase; long-line effects also appear. MSTs with permanent magnets were developed aiming to decrease power loss and to simplify the design (elimination of magnetizing circuits). Analog USG control system enables two-way communication with plant automated process control system and incorporates a display indicating main parameters of generator operation mode. Technical design described leaded to the development of a novel set of ultrasonic devices, allowed to prepare the USE mass production, thus providing customers with affordable and durable US generators and MSTs. Further R&D continues in this direction.

Keywords: ultrasonic equipment, ultrasonic generator, magnetostrictic transducer with permanent magnets, USG, UST.

Введение

Ультразвуковая аппаратура (УЗА) включает в себя ультразвуковй генератор (УЗГ), устройства связи (кабели, фильтры, компенсирующие элементы), преобразователь магнитострикционный (ПМС), инструмент – акустический волновод, согласовывающий магнитостриктор со средой, увеличивающий амплитуду колебаний, фокусирующий механическое воздействие и т.д., оснастку (направляющие, ванны и другие вспомогательные изделия для получения требуемой интенсивности ультразвука, позиционирования обрабатываемого изделия и среды по отношению к инструменту)[1-5].

1. Ультразвуковые генераторы

В СССР в 1960г. по постановлению Совмина организация серийного производства УЗА

была поручена Московскому радиотехническому заводу (МРТЗ). Было организовано производство генераторов УЗГ10 (ламповый), УЗГ1, УЗГ2, УЗГ3 (тиристорные). Крупной серией был выпущен генератор УЗГ3-4. Он был спроектирован по блочной схеме, обладал высокой помехоустойчивостью, надежностью и возможностью работы со всеми типами магнитострикторов. Известны случаи эксплуатации данного вида генераторов до сих пор, более 40 лет (Ярославский завод дизельной аппаратуры). Небольшими сериями выпускались УЗГ16 (на полевых транзисторах, разработки ВНИИТВЧ, г. Ленинград)[6], УЗГ2, УЗГ5, УЗГ10 (на полевых транзисторах JBT, разработка Уральского политехнического института). В настоящее время прогнозируется потребность в УЗА для опасных производств, работ в условиях высоких давлений, температур, механических нагрузок и при существенном удалении инструмента от УЗГ. На начальной стадии НИОКР находится УЗГ3000. В нем используется блочная конструкция (как в УЗГ3-4), аналоговая система управления (позволяет добиться высокой помехоустойчивости, оптимизировать режимы работы силовых транзисторов, обеспечить безусловную защиту от короткого замыкания).

2. Магнитострикционные преобразователи, особенности согласования с УЗГ

На заводе МРТЗ было организовано серийное производство ПМС типа ПМС6-22, ПМС15, ПМС1 и т.д., сопровождение которых выполняла лаборатория 113 КБ МРТЗ. Эти изделия имели магнитопроводы в виде пакетов пластин из пермендюра массой от 0,7 кг до 3 кг, а с присоединёнными акустическими трансформаторами становились ещё более массивными.

Работа излучателя (ПМС и инструмента) в резонансных режимах в жидкой среде приводит к превышению порога дегазации, особенно при работе в средах с высоким содержанием растворенного газа (газовым фактором). Выделение газа вокруг излучателя вызывает резкое падение акустической нагрузки, что переводит излучатель из двигательного режима в генераторный режим. При этом запасенная ранее реактивная энергия (до 10 кВт) повышает напряжение на выводах ПМС до нескольких киловольт. Это напряжение возвращается выходным трансформатором УЗГ на полупроводниковые элементы инвертора (транзисторы или тиристоры), что может приводить к выходу их из строя.

Для предотвращения возникновение аварии при резком изменении акустической нагрузки были использованы схемы инверторов со встречными диодам, которые частично защищали транзисторы. Для усиления защиты тиристоров УЗГ3-4 были применены высокочастотные диоды, ограничивающие перенапряжение на нагрузке (ПМС). В том же генераторе были установлены дополнительные диоды в инверторе, рекуперирующие излишнюю колебательную энергию в конденсатор фильтра [7]. В современных УЗГ эти

средства защиты используются опционально, в случае разработки УЗА, работающей на резко переменную акустическую нагрузку.

Описанные выше критические режимы резкого снижения акустической нагрузки (образование газовой среды вокруг излучателя) приводят к существенному обострению амплитудно-частотной характеристики (АЧХ), повышению резонансной частоты излучателя на величину до 300 Гц и быстрому сильному увеличению его добротности. При восстановлении акустической нагрузки («сдувании газовой «подушки» с излучателя) происходит быстрое снижение добротности и резкое «уплощение» АЧХ. Для работы в таких условиях была разработана система автоматического регулирования частоты со специальными характеристиками. Эта система управления, с одной стороны, позволяет осуществлять быстрый поиск резонансной частоты при резком падении акустической нагрузки (при появлении газовой среды вокруг излучателя); с другой стороны, она обеспечивает точную перестройку резонансной частоты при возвращении акустической нагрузки в норму (при «сдувании газовой «подушки» с излучателя) и ее стабильное поддержание. Система управления основывается на алгоритме экстремального регулирования.

3. Оптимизация работы УЗА

При некоторых технологических процессах приходится располагать УЗГ и излучатель на расстоянии до нескольких километров. Связь между ними обеспечивается специальными электрическими кабелями, которые должны работать в условиях высоких температур, высоких давлений, агрессивной химической среды и при высоком радиоактивном излучении. Такие кабели изготавливают по принципу витой пары с экранирующим бронированием и применением полимерных материалов с низкой диэлектрической проницаемостью. Во время работы УЗА эти длинные кабели проявляют свойства электрических элементов с распределенными параметрами. Для учета влияния этих параметров определяют погонные значения индуктивности, емкости и активного сопротивления. По этим характеристикам производят расчеты в соответствии с теорией длинных линий. Определяют волновые параметры кабеля (волновое сопротивление, фазовая задержка, волновая длина). Эти параметры сильно зависят от частоты передаваемого возбуждения и характеристик внешней среды. В случае рассогласованного режима работы такого кабеля с излучателем определяется степень отражения электрической энергии от конца кабеля, рассчитываются потери, согласовываются режимы возбуждения ПМС. Также при длине кабеля в несколько километров имеется опасность возникновения четвертьволнового режим этого кабеля на основной частоте возбуждения ПМС. Нами разработаны технические решения выделения основной гармоники возбуждения излучателя и подавления высокочастотных гармоник в

электрическом сигнале, проходящем по кабелю. Применяются схемы искусственного увеличения волновой длины реального кабеля. Компенсируются изменения волновых характеристик кабеля от воздействий внешней среды при эксплуатации кабеля.

При работе в среде с низкой плотностью остро стоит задача максимизации передаваемой энергии [1-5]. По закону прохождения волны через границу раздела сред с разной плотностью происходит увеличение энергии отраженной при росте отношения плотностей сред. Так, акустическая энергия, предаваемая менее плотным титановым волновым инструментом, существенно выше энергии, передаваемой стальным инструментом в среду низкой плотности – воду. Для перехода на использование титановых инструментов была отработана технология пайки пермендюрового пакета к титановому волноводу с использованием индукционного нагрева.

Другим аспектом оптимизации работы УЗА при вынужденном удалении излучателя от УЗГ является уменьшение токовой нагрузки на жилы кабеля. Согласно общепринятой схеме питания магнитостриктора, по кабелю пропускается ток подмагничивания и ток возбуждения. Ток подмагничивания выводит ПМС в рабочую точку магнитострикционной характеристики. При протекании этого тока через медные жилы кабеля происходят большие активные потери с выделением тепла. Существуют теоретические разработки конструирования ПМС, обеспечивающие подмагничивание ПМС с помощью постоянных магнитов. Это решение позволяет исключить необходимость пропускания тока подмагничивания по кабелю и упрощает конструкцию УЗГ (убирается блок подмагничивания). Данное техническое решение принесет существенную экономию при выходе на серийное производство УЗА. Проработан вопрос организации выпуска необходимых постоянных магнитов в РФ.

4. Система управления УЗГ

Наиболее важным узлом УЗГ является система управления силовыми транзисторами инвертора. Эта система управления должна обладать высокой помехоустойчивостью (точность включения и выключения транзистора). Система управления должна обеспечивать эффективное управление силовыми транзисторами: точно формировать импульс с крутым фронтом для открытия транзистора и импульс для закрытия транзистора. Цифровые элементы часто имеют погрешность пропуска одного или нескольких импульсов. Это может приводить к сбою работы УЗГ и выходу его из строя. На наш взгляд более надежной, гарантированно выдающей импульс управления транзисторами является аналоговая схема генератора, управляемого напряжением (ГУН). Изменение управляющего напряжения ГУН производится с помощью цифро-аналогового преобразователя. Он располагается в микроконтроллере, исполняющем функцию управления частотой и мощностью УЗГ. Сбор информации о режиме работы УЗА (тока, напряжения) производится встроенным в микроконтроллер аналого-

цифровым преобразователем. Индикация этих параметров производится на собственном мониторе, установленном на лицевой панели УЗГ. Также этот микроконтроллер осуществляет двухстороннюю связь с программно-логическим комплексом (ПЛК) верхнего уровня АСУТП УЗА.

ПЛК управляет режимами работы УЗГ, управляет его состояниями (включен, выключен, повторный запуск, перезагрузка), получает необходимую технологическую информацию (температура, давление, плотность, скорость протока среды, в которой находится излучатель). На основе этих данных ПЛК, используя запрограммированный локальный алгоритм управления, формирует команды управления УЗГ. Через блок GSM-связи, встроенный в ПЛК, УЗА подключается к центральному диспетчерскому пункту управления. Протоколирование собранной информации позволяет оценивать эффективность работы каждого комплекта, оценивать работоспособность и планировать работы по обслуживанию УЗА.

Заключение

Изложенные выше технологии и усовершенствования УЗА, основанной на магнитострикционном эффекте, позволяют повысить ее КПД и приблизить его к КПД УЗА на пъезокерамике. Надежность и прочность магнитострикционного инструмента позволяет использовать его в условиях высоких давлений, температур, механических нагрузок и при существенном удалении инструмента от УЗГ.

Список литературы:

1. *Бергман Л.* Ультразвук и его применение в науке и технике. М.: ИИЛ, 1957.

2. Сб. Источники мощного ультразвука. *Под редакцией Л.Д.Розенберга.* М., «Наука», 1968.

3. *Теумин И.И*. Ультразвуковые колебательные системы. Москва: Машгиз, 1959.

4. *Донской А.В., Келлер О.К., Кратыш Г.С.* Ультразвуковые электротехнологические установки. Ленинград. Энергоиздат. Ленинградское отделение, 1982.

5. Мощный ультразвук в металлургии и машиностроении / *Под ред. Абрамова О.В. и Приходько В.М.* – М.: Янус –К, 2006.

6. *Петушко И.В.* Оборудование для ультразвуковой обработки, Санкт-Петербург, 2005г.

7. Авторское свидетельство №997205 (СССР). Последовательный автономный инвертор. *В.В. Шипицын, В.И. Лузгин, А.А. Рухман и др.*

УДК: 534.2 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39671

Анализ результатов ультразвуковой модификации поверхности древесины после длительного хранения

А.А. Вьюгинова[1,a], С.Н. Вьюгинов[2,b], Л.Л. Леонтьев[3,b], А.А. Новик[2,b]

[1] *СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 197022, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, д. 5.*

[2] *ООО «ИНЛАБ - Ультразвук», 194044, Санкт-Петербург, ул. Чугунная, д. 20.*

[3] *СПбГЛТУ им. С.М. Кирова, 194021, Институтский пер. 5, Санкт-Петербург*

E-mail: [a]aavyuginova@etu.ru, [b]inlab@utinlab.ru, [c]leontyev-lta@mail.ru

Аннотация: Рассматриваемая технология ультразвуковой модификации древесины позволяет получить значительное улучшение характеристик поверхностного слоя – плотности и твердости – с использованием ультразвукового оборудования проходного типа, обеспечивающего возможность непрерывной обработки. В данной работе анализируется стабильность во времени результатов ультразвуковой обработки древесины осины (*Populus tremula*) после длительного хранения в течение нескольких лет в условиях отапливаемого помещения, рассмотрены образцы, отличающиеся степенью модификации. Исследование макро- и микро-свойств модифицированной поверхности древесины показало их стабильность во времени, отсутствие значимых релаксационных процессов во время хранения для всех образцов – при увеличении значений твердости поверхности после ультразвуковой обработки в 2-4 раза снижение твердости после хранения не превышает нескольких процентов, обоснован механизм ультразвуковой модификации древесины, включающий пластификацию лигнина. Полученные результаты подтверждают потенциал рассматриваемой технологии ультразвуковой модификации поверхности древесины.

Ключевые слова: модификация древесины; твердость древесины; плотность древесины; ультразвуковая технология; мощный ультразвук

Analysis of the results of wood surface ultrasonic modification after long-term storage

A.A. Vjuginova[1,a], S.N. Vjuginov[2,b], L.L. Leontyev[3,b], A.A. Novik [2,b]

[1] *Department of Electroacoustics and Ultrasonic Engineering, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", 5 Professora Popova street, St. Petersburg, 197376, Russia*

[2] *LLC «INLAB - Ultrasonic», 20 Chugunnaya st., St. Petersburg, 194044, Russia*

[3] *Department of Wood Science and Forest Protection, Saint Petersburg State Forest Technical University, 5 Institute per., St. Petersburg, 194021, Russia*

E-mail: [a]*aavyuginova@etu.ru*, [b]*inlab@utinlab.ru*, [c]*leontyev-lta@mail.ru*

Abstract: The considered technology of ultrasonic modification of wood allows to obtain a significant improvement in the characteristics of the surface layer – density and hardness – using ultrasonic equipment of the pass-through type, providing the possibility of continuous processing. In this work, the stability in time of the results of ultrasonic processing of aspen wood (*Populus tremula*) after long-term storage for several years in conditions of a heated room is analyzed, samples differing in the degree of modification are considered. The study of the macro- and micro-properties of the modified wood surface showed their stability over time, the absence of significant relaxation processes during storage for all samples – with an increase in the surface hardness values after ultrasonic processing by 2-4 times, the decrease in hardness after storage does not exceed a few percent, the mechanism of ultrasonic modification of wood, including lignin plasticization, is substantiated. The obtained results confirm the potential of the considered technology of ultrasonic modification of the wood surface.

Keywords: wood modification; wood hardness; wood density; ultrasonic technology; power ultrasound

PACS: 43.35.Zc

Введение

Древесина – широкодоступный природный возобновляемый ресурс, с древнейших времен человечество использовало древесину для изготовления различных объектов необходимых для повседневной жизни и деятельности и, конечно, для строительства и внутреннего обустройства своих домов.

Переход к расширению использования возобновляемых природных ресурсов и внедрение более экологичных методов их обработки имеет большое значение для устойчивого развития общества [1]. Древесина как природный ресурс и строительный, отделочный материал обладает как рядом общеизвестных достоинств, таких как возобновляемость,

относительные простота обработки и использования, приемлемая стоимость, также имеет и известные недостатки, такие как недостаточные в ряде случаев прочность, плотность и твердость, химическая и биологическая стойкость и др., которые можно преодолеть с помощью различных методов модификации – их подробный анализ представлен в [2-3].

Различные технологии модификации, обработки и пропитки позволяют изменить структуру материала и улучшить физико-механические свойства древесины – повысить плотность, твердость, прочность, износостойкость, истираемость, снизить водопоглощение, повысить пожаро- и биостойкость материала, улучшить его декоративные свойства [4-7]. Отдельный интерес представляют технологии модифицирования малоценной древесины мягких пород [8], которые могут стать эффективным способом восполнения дефицита высококачественной менее доступной и более дорогой древесины, позволят уменьшить проблему нехватки древесины с заданными свойствами.

Одна из задач модификации древесины – повышение плотности и твердости поверхностного слоя для изделий из недорогих пород. Задача повышения качества поверхности древесины стоит во всем мире, с целью разработать соответствующие технологические процессы проведено и проводится множество исследований. Исследователи отмечают, что технология поверхностного уплотнения должна быть высокоскоростной, экономичной и энергоэффективной [2], такими свойствами могут обладать устройства, реализующие принцип непрерывной обработки. В этом случае, в том числе, стоимость конечного продукта не будет выходить из категории доступных материалов. Именно о технологии непрерывной ультразвуковой обработки поверхности древесины идет речь в данной работе.

В работе исследуется стабильность результатов ультразвуковой модификации древесины после длительного хранения: для образцов осины (*Populus tremula*), поверхность которых была подвергнута ультразвуковой обработке в трех различных режимах, повторно измерялась твердость поверхности после хранения в течение более 5 лет. Результаты исследования важны для определения возможностей использования изделий из древесины, модифицированных ультразвуковым методом.

1 Метод ультразвуковой модификации поверхности древесины

Воздействие мощных ультразвуковых колебаний в сочетании с механическим давлением на поверхность древесины создает на ее поверхности слой с улучшенными свойствами – увеличенными плотностью и твердостью. Рассматриваемая ультразвуковая технология для осуществления уплотнения, модификации и улучшения качества поверхностного слоя древесины осуществляется с помощью ультразвукового устройства проходного типа: изделие

из древесины с плоскопараллельными поверхностями подается гидравлической транспортной системой в модуль ультразвуковой обработки, где верхняя и нижняя поверхность изделия подвергаются воздействию мощных ультразвуковых колебаний, создаваемых расположенными друг напротив друга ультразвуковыми волноводами, и механического давления (рис. 1). При этом технология не требует нагрева или использования химических пропиток, важно, что технология реализуется за один проход через устройство при скорости обработки несколько метров в минуту [9-12]. Ранее возможности применения мощных ультразвуковых полей в сочетании с давлением для воздействия на древесину были описаны в нескольких патентах, например, для круглой цельной древесины [13-14], при этом в ранее описанных вариантах ультразвуковые колебания воздействовали на матрицу или фильеру.

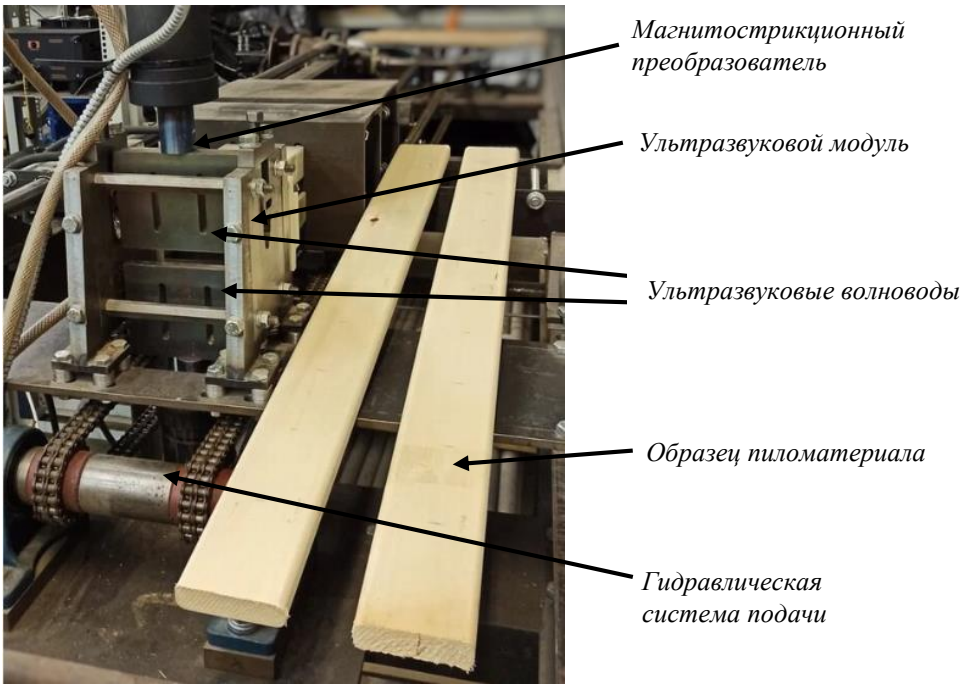


Рис. 1. Ультразвуковое оборудование для обработки древесины

Ультразвуковой модуль рассматриваемого ультразвукового устройства, представляющий собой два ультразвуковых волновода, находящихся с непосредственном контакте с поверхностью древесины – что обеспечивает высокоинтенсивное воздействие с высокой амплитудой, имеет регулируемый зазор. В процессе обработки зазор имеет меньшую толщину, чем толщина заготовки. Разница между этими значениями является параметром обработки Δ, характеризует ее степень. После обработки на обеих поверхностях заготовки образуются модифицированные слои, которые имеют повышенную плотность, твердость, уменьшенную пористость.

2 Образцы и способы их оценки

При хранении обработанных пиломатериалов основным фактором внешней среды,

который может повлиять на их свойства, является влажность. Поскольку одно из возможных направлений применения технологии ультразвуковой модификации поверхности древесины – это улучшение качества строительных и отделочных материалов, которые используются для внутренней отделки помещений, то важным является подтверждение долговременной стабильности результатов модификации при нахождении в помещении. Для проведения экспериментов была выбрана осина, как одна из наиболее подходящих пород для осуществления уплотнения.

Изначально были подготовлены три полноразмерных образца осины (*Populus tremula*) влажностью 12%, длиной 2.5 м, толщиной 27.8 мм и шириной 90 мм. Они были подвергнуты ультразвуковой обработке с помощью описанного ультразвукового оборудования с параметрами обработки Δ = 1.8 мм, 2.8 мм и 3.8 мм и скоростью обработки 4 м/мин. Твердость поверхности оценивалась вдоль образцов до и после обработки по продольной координате L с шагом 100 мм, для каждой координаты измерение проводилось в трех точках, затем результаты этих трех измерений усреднялись.

Для подтверждения стабильности полученных результатов повышения твердости поверхности после ультразвуковой обработки была повторно измерена твердость образцов после более 5 лет хранения в отапливаемом помещении при относительной влажности воздуха 55±15%, в условиях, которые соответствуют ряду стандартов (например, ГОСТ 862.1-2020).

Для измерения твердости поверхности использовался прибор для определения твердости MET-UD, основанный на методе Либа (ASTM A956-02), который подходит для измерения твердости поверхностного слоя толщиной 1-2 мм без повреждений. По методу Либа определяется соотношение скорости бойка до (V_0) и после (V_1) столкновения с поверхностью, значение твердости при этом определяется как $HL = 1000*V_1/V_0$. Таким образом, данный метод позволяет оценить относительное изменение твердости поверхности древесины.

Для изучения внутренней структуры образцов древесины после хранения использовался сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) Hitachi TM4000Plus. Срез представлял собой полный поперечный срез из средней части образцов с минимальной (Δ = 1.8 мм) и максимальной (Δ = 3.8 мм) степенью ультразвуковой обработки.

3 Результаты

Полученные результаты измерений твердости приведены в табл. 1, более подробное описание результатов представлено в [15]. Как видно для образца с наименьшим параметром обработки, Δ=1.8 мм, в среднем увеличение твердости после ультразвуковой обработки составляет 2.4 раза, а снижение после хранения – 6.6%. Для образца с Δ=2.8 мм в среднем увеличение составляет 3.2 раза, а снижение после хранения – 3.4%. Для образца с наибольшим

параметром обработки, Δ=3.8 мм, в среднем увеличение составляет 3.7 раза, а снижение после хранения – 2.4%. Таким образом, наблюдается незначительное снижение твердости поверхности древесины после длительного хранения. Это снижение меньше для образцов с более высокой степенью ультразвуковой обработки. Полученные результаты подтверждают стабильность полученной твердости поверхности древесины в данных условиях.

Таблица 1

Результаты измерения твердости

Δ, степень обработки – разница между толщиной образца и толщиной зазора (мм)	Исходная твердость (HL)	Твердость после ультразвуковой обработки (HL)	Твердость после хранения (HL)
1.8	113±13	271±25	253±13
2.8	119±18	379±16	366±13
3.8	113±16	414±23	404±17

Ниже представлены результаты исследований внутренней структуры образцов после хранения с использованием СЭМ для двух вариантов параметров обработки: минимального (Δ = 1.8) – рис. 2, а, и максимального (Δ = 3.8) – рис. 2, б.

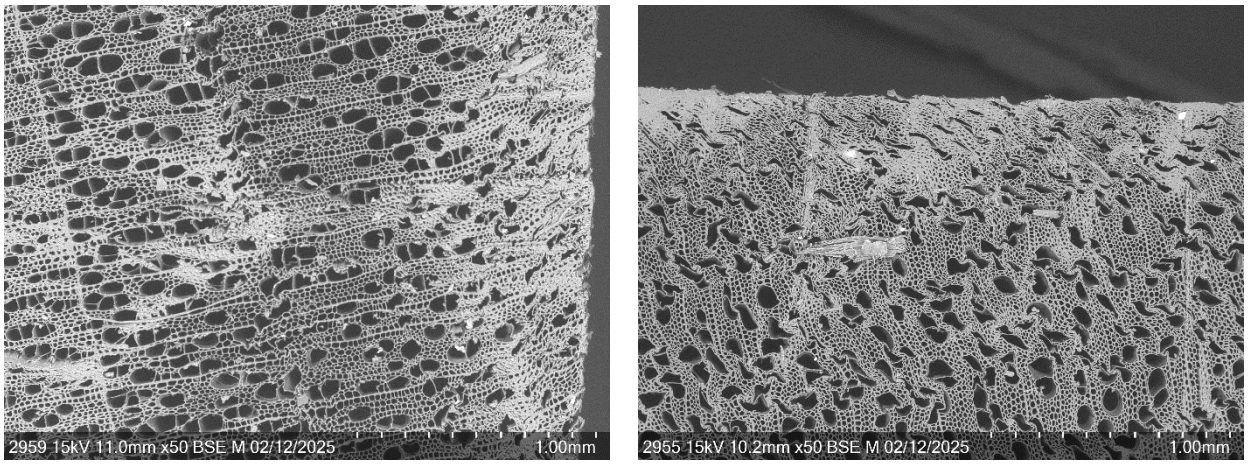


Рис. 2. СЭМ-изображения срезов образцов: а – Δ = 1.8; б – Δ = 3.8.

По результатам изучения внутренней структуры образцов видно, что деформации в образцах древесины после длительного хранения сохраняются. В образце с минимальным параметром обработки наблюдается значительная поперечная деформация клеток на глубину до 0.7 мм со смещением в сторону наклона сердцевинных лучей, частичная деформация на глубине 1.0 мм под слоем недеформированных клеток. В образце с максимальным параметром обработки наблюдается значительная поперечная деформация клеток на глубину до 3-3.5 мм со смещением в сторону наклона сердцевинных лучей, а при перпендикулярном к поверхности направлении лучей – с зигзагообразным смятием. При этом аналогично для обоих образцов полости сосудов и волокон независимо от поперечного размера клетки в поверхностной зоне

образца практически исчезают или принимают щелевидную форму без разрыва клеточных оболочек, сердцевинные лучи искривляются и загибаются.

Анализ СЭМ-изображений позволяет сделать важный вывод о том, что структура клеточных стенок древесины не повреждается при ультразвуковой обработке, видимые повреждения структуры после хранения также отсутствуют. Повреждения внутренней структуры приводили бы к снижению прочности и ухудшению механических свойств древесины. В данном случае все деформации носят пластический характер и сохраняются при хранении. Этот факт подтверждает, что механизм ультразвуковой модификации включает в себя режим пластификации лигнина, что позволяет зафиксировать сжатый поверхностный слой древесины. Кроме того, обработанная поверхность имеет пониженную пористость, что также уменьшает влияние внешних факторов. Эти результаты для микроструктуры обеспечивают стабильность макроскопических свойств поверхности древесины при хранении.

Заключение

Была исследована стабильность результатов ультразвуковой модификации поверхности древесины после длительного хранения. Твердость поверхности образцов осины (*Populus tremula*) была измерена после обработки и повторно после хранения в течение более 5 лет в отапливаемом помещении при относительной влажности 55±15%. Показано, что снижение твердости после хранения незначительно и не превышает нескольких процентов.

Показано, что клеточные стенки древесины не повреждается при ультразвуковой обработке, видимые повреждения структуры после хранения отсутствуют. Этот факт подтверждает, что механизм ультразвуковой модификации включает в себя режим пластификации лигнина. Все наблюдаемые деформации в поверхностном слое древесины имеют пластическую природу и сохраняются при хранении. Эти результаты для микроструктуры древесины обеспечивают стабильность макроскопических характеристик твердости поверхности при хранении без заметных релаксационных изменений.

Полученные результаты подтверждают потенциал ультразвукового метода для модификации поверхности древесины, поскольку внутренняя структура и твердость поверхности характеризуются стабильностью во времени.

Список литературы

1. *Olivetti E.A, Cullen J.M*. Toward a sustainable materials system // Science. 2018. **360**. P. 1396.

2. *Sandberg D., Kutnar A., Karlsson O., Jones D*. Wood Modification Technologies: Principles, Sustainability, and the Need for Innovation. Boca Raton: CRC Press, 2021.

3. *Hill C.A.S*. Wood Modification: Chemical, Thermal and Other Processes. Chichester, UK: Wiley and Sons, 2006.

4. *Zelinka S.L., Altgen M., Emmerich L., Guigo N., Keplinger T., Kymäläinen M., Thybring E.E., Thygesen L.G*. Review of Wood Modification and Wood Functionalization Technologies // Forests. 2022. **13**. P. 1004.

5. *Zhang B., Pizzi A., Petrissans M., Petrissans A., Colin B.* A melamine–dialdehyde starch wood particleboard surface finish without formaldehyde // J. of Renewable Materials. 2023. **11**. P. 3867.

6. *Mubarok M., Gérardin-Charbonnier C., Azadeh E., Akong F.O. et al*. Modification of wood by tannin-furfuryl alcohol resins–effect on dimensional stability, mechanical properties and decay durability // J. of Renewable Materials. 2023. **11**. P. 505.

7. *Hill C.A.S., Altgen M., Rautkari L*. Thermal modification of wood – a review: chemical changes and hygroscopicity // J. of Materials Science. 2021. **56**. P. 6581.

8. *Sandberg D., Kutnar A., Mantanis G*. Wood modification technologies – a review // iForest. 2017. **10**. P. 895.

9. *Иванов В.А., Новик А.А., Новик А.А., Новик А.А*. Устройство для ультразвуковой обработки древесины. Патент RU2419537, 2011.

10. *Вьюгинова А.А., Вьюгинов С.Н*. Устройство для ультразвуковой обработки пиломатериалов. Патент RU130909, 2013.

11. *Vjuginova A.A., Novik A.A., Vjuginov S.N., Ivanov V.A.* Ultrasonic modification for improvement of wood-Surface properties // Wood Material Science & Engineering. 2023 (online: 2021). **18**. P. 193.

12. *Вьюгинова А.А., Вьюгинов С.Н., Новик А.А*. Устройство для ультразвуковой модификации пиломатериалов. Патент RU213732U1, 2022.

13. *Базаров С.М., Гурьянов А.В., Легуша Ф.Ф., Пугачев С.И*. Способ уплотнения и формообразования изделий из цельной древесины и устройство для его осуществления. Патент RU2089385, 1997.

14. *Sun-Tae An*. Method and apparatus for increasing the hardness and intensity of wood. Patent WO2000013865A3, 2000.

15. *Vjuginova A.A., Leontyev L.L*. Ultrasonic Modification of Wood Surface: Study of Macro and Micro Properties after Long-Term Storage // J. of Renewable Materials. 2025. **13**. P. 1819.

УДК: 534.8.081.7 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39672

Ультразвуковая визуализация объемной микроструктуры углепластиков при циклических изгибных нагрузках

Володарский А.Б. [a], **Мороков Е.С.**[b]

Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля Российской академии наук, Москва.

E-mail: [a]sashavolodarski@gmail.com, [b] *es_morokov@yahoo.com*

Аннотация: В углепластиковом композите исследована эволюция внутренних повреждений при изгибном нагружении. Сравнены результаты, полученные для образцов с одинаковой укладкой волокон, но различными полимерными матрицами. Для исследования морфологии дефектов применялся метод сканирующей ультразвуковой акустической микроскопии. Было выявлено, что тип матрицы определяет характер и динамику накопления повреждений, существенно влияя на стойкость материала к изгибному нагружению.

Ключевые слова: акустическая микроскопия, углепластик, изгибное нагружение, визуализация микроструктуры.

Ultrasonic visualization of the volume microstructure of carbon fiber reinforced plastics under cyclic bending loads

A.B. Volodarskii[a], **E.S. Morokov**[b]

Emanuel Institute of Biochemical Physics of Russian Academy of Sciences. Moscow 119334, Russia.

E-mail: [a]sashavolodarski@gmail.com, [b] *es_morokov@yahoo.com*

Abstract: The evolution of internal damage under bending loading was studied in a carbon fiber composite. Results obtained for samples with the same fiber arrangement but different polymer matrices were compared. Scanning ultrasonic acoustic microscopy was used to study the defect morphology. It was found that the matrix type determines the nature and dynamics of damage accumulation, significantly affecting the material's resistance to bending loading.

Keywords: acoustic microscopy, carbon fiber, bending loading, microstructure visualization

PACS: 43.58.Ls

УДК: 534-13. DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39673

Развитие ультразвуковой сварки при производстве изделий медицинского назначения

В.Н. Хмелев[1,a], Р.В. Барсуков[1,b], В.А. Нестеров[1,c], Д.В. Генне[1,d], А.В. Цхе [2,e]

[1)] Бийский технологический институт, г. Бийск

[2)] ООО «Профит-фарм», г. Москва;

E-mail: [a]vnh@u-sonic.ru, [b]roman@u-sonic.ru, [c]nva@u-sonic.ru, [d]gdv@u-sonic.ru, [e]alex414@mail.ru.

Аннотация: Одним из востребованных направлений применения ультразвуковой сварки является производство изделий медицинского назначения, к которым относятся гибкие полимерные пакеты, используемые хранения различных медицинских препаратов, забора и хранения крови, а так же и ее производных компонентов. Существующее оборудование для производства таких изделий на базе ТВЧ технологии имеет ряд недостатков, таких как: большие энергозатраты, требовательность к свойствам свариваемых материалов и окружающим условиям, проблемы при сварке разнородных материалов, относительно большое время формирования сварного соединения.

Исследования возможностей применения УЗ сварки для производства подобных изделий медицинского назначения позволили разработать технологии для: сварки листовых материалов (двух- трехслойные конструкции), сваривания элементов различной конфигурации (вваривание, так называемых, портов в тело полимерного пакета), сварки разнородных материалов (например, приваривание к основному материалу изделия паропрозрачных мембран и т.п.), формирования линейных и криволинейных протяженных сварных швов, сварных швов с замкнутым периметром, герметизации трубчатых магистралей гемоконтейнеров. В результате проведенных исследований создано оборудование для производства полимерных пакетов различного назначения, используемых службами крови, а так же УЗ оборудования для герметизации гемоконтейнеров, которое отличается высокой производительностью, экономичностью и обеспечивает требуемое качество продукции.

Ключевые слова: ультразвук, сварка, контроль, качество, кровь.

Development of ultrasonic welding in the production of medical products

V.N. Khmelev[1,a], R.V. Barsukov[1,b], V.A. Nesterov[1,c], D.V. Genne[1,d], A.V. Tche [2,e]

[1)] Biysk Technological Institute, Biysk;

[2)] OOO «Profit-farm», Moscow;

E-mail: [a]vnh@u-sonic.ru, [b]roman@u-sonic.ru, [c]nva@u-sonic.ru, [d]gdv@u-sonic.ru, [e]alex414@mail.ru.

Abstract: One of the most popular applications of ultrasonic welding is the production of medical devices. These include flexible polymer bags used to store various medications, blood collection and storage, and blood derivatives. Existing high-frequency welding equipment has several drawbacks. These include high energy consumption, high demands on the properties of the materials being welded and environmental conditions, problems when welding dissimilar materials, and a relatively long weld formation time. Research in ultrasonic welding has enabled the development of equipment and refined technologies for: welding sheet materials (two- and three-layer structures), welding elements of various configurations (welding so-called ports into the body of a polymer bag), welding dissimilar materials (for example, welding vapor-permeable membranes to the base material of the product, etc.), forming linear and curved extended welds, and welds with a closed perimeter. As a result of the research conducted, equipment was created for the production of polymer bags for various purposes used by blood services, which is characterized by high productivity, cost-effectiveness, and quality.

Keywords: ultrasound, welding, control, quality, blood.

PACS: 07.64.+z

Введение

Ультразвуковая сварка (УЗ) популярна в различных отраслях промышленности. Технология позволяет создавать прочные неразъёмные соединения металлов и пластмасс без нагрева до температуры плавления. Основными преимуществами ультразвуковой сварки перед другими видами сварки являются: повышенная производительность, высокая прочность соединения; широкий диапазон соединяемых материалов различной толщины, высокая стабильность, минимальная деформация заготовок; сварка без очистки загрязненных поверхностей, отсутствие вредного воздействия на экологию и необходимости в дополнительных расходных материалах; небольшая мощность оборудования и, как следствие, низкое энергопотребление.

Одним из перспективных и востребованных направлений применения ультразвуковой сварки является производство изделий медицинского назначения, к которым относятся гибкие полимерные пакеты (гемоконтейнеры), используемые для хранения различных медицинских препаратов, забора и хранения крови и ее компонентов. Существующее оборудование для производства таких изделий на базе ТВЧ технологии имеет ряд недостатков, таких как: большие энергозатраты, необходимость использования материалов только с определенными свойствами, необходимость создания определенных условий по влажности на производстве, сложности соединения разнородных материалов, относительно большое время формирования сварного соединения.

Углубленные исследования механизмов УЗ сварки, а так же исследования возможностей применения УЗ сварки для производства подобных изделий медицинского назначения позволили отработать технологии и создать оборудование для: сварки листовых материалов (двух- трехслойные конструкции), сваривания элементов различной конфигурации (вваривание, так называемых, портов в тело полимерного пакета), сварки разнородных материалов (например, приваривание к основному материалу изделия паропрозрачных мембран и т.п.), формирования линейных и криволинейных протяженных сварных швов, сварных швов с замкнутым периметром. Кроме того, в результате проведенных теоретических и практических исследований удалось создать оборудование, предназначенное не только для производства изделий, используемых службами крови (пластиковые гемоконтейнеры), но и оборудование для его непосредственного использования службами крови, например, для герметизации трубчатых магистралей гемоконтейнеров при заборе, хранении или переработки крови и ее компонентов.

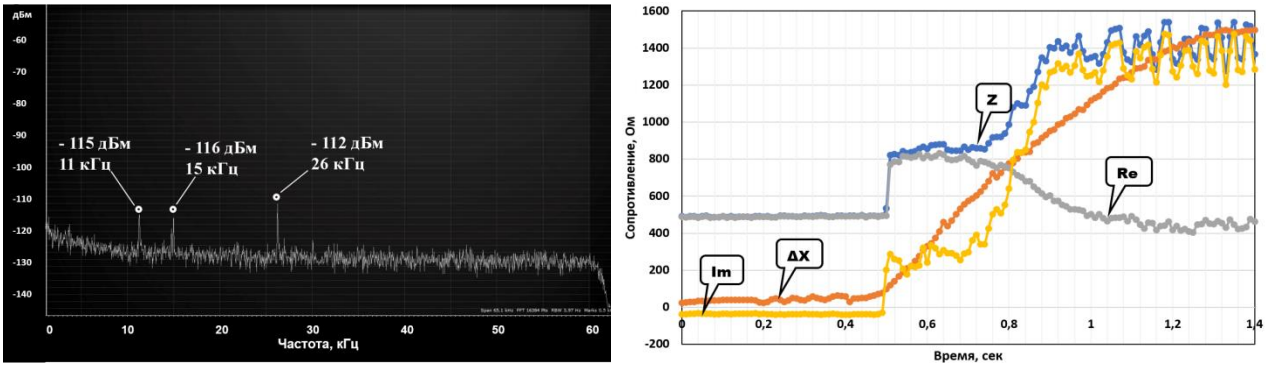
Результаты теоретических и практических исследований УЗ сварки

Для проведения теоретических исследований влияния УЗ энергии на реологические свойства полимерных материалов и выявления оптимальных условий и режимов реализации УЗ сварки была построена нелинейная математическая модель распространения акустических

колебаний в расплавах полимеров [6]. Анализ модели позволил подтвердить возможность возникновения кавитации в расплавах полимерных материалов, которая может являться одним из главных интенсифицирующих факторов диффузионных процессов.

Кроме того, работа с моделью позволила установить, что на границах свариваемых материалов возможно возникновение капиллярных волн, позволяющих увеличивать межфазную поверхность до 1,5 раз и более, тем самым ускоряя скорость взаимопроникновения материалов при сварке.

Наличие кавитационных явлений в расплавах полимеров было экспериментально подтверждено с помощью разработанного оптикоэлектронного измерительного стенда, в основу которого, в частности, положен принцип [7] рассеяния оптического излучения на неоднородностях, находящихся в ней. Кавитационные пузырьки выступают в качестве неоднородностей в прозрачных расплавах полимеров. Были получены спектры (см. рис. 1, *а*) рассеянного излучения, на выходе оптического датчика при просвечивании прозрачного расплава полимерного материала в присутствии УЗ полей высокой интенсивности. Яркие пики на спектральной картине свидетельствуют о том, что в расплаве полимеров возникают условия для кавитационных явлений (зарождения пульсирующих газовых пузырьков).



а) б)

Рисунок 1 - Спектр рассеянного сигнала а); зависимость импеданса УЗ излучателя б).

При этом, с одной стороны, кавитация в полимере содействует процессу сварки, ускорения диффузионные процессы на границе соединения материалов, но, с другой стороны, наличие вырожденных пузырьков (не коллапсирующих при УЗ воздействии), может приводить к образованию газовых полостей, которые ослабляют сварной шов после его остывания.

В связи с этим, возникает необходимость контроля процесса сварки с учетом необходимости формирования в полимере кавитационного процесса, но исключения, при этом, режима формирования резонансных долгоживущих пузырьков, образующих нежелательные полости при завершении процесса.

Полученные в ходе воздействия на расплав полимера спектры были сопоставлены с электрическими измерениями импеданса УЗ излучателя Z [8], его действительной Re и

мнимой Im составляющих (см. рис. 1, *б*), и совокупностью данных о прочности формируемых сварных соединений. Это позволило выявить условия необходимого и достаточного воздействия на полимер (точку на спадающем склоне зависимости $Re = f(t)$, где t – время). Из серии тестовых сварок образцов в количестве 250 шт. и проверки их на разрыв было установлено, что при реализации выбранных условий и режимов сварки, количество сварок, прочность соединения материалов в которых составляет не менее 80% от прочности исходного материала, составляет 89.6%.

Результаты исследований, а также выявленный критерий оптимальности УЗ воздействия на процесс сварки были положены в основу созданного УЗ оборудования.

Использование результатов теоретических и практических исследований

На рис. 2 представлено фото созданного автономного ультразвукового запаивателя, предназначенного для герметизации трубчатых медицинских магистралей. Потребность в таких устройствах особенно актуальна для условий, где затруднен доступ к питающей электрической сети, а так же для полевых условий. Так же на рис. 2 показано фото рабочей части УЗ головки запаивателя с установленной трубчатой магистралью, и фото образца формируемого герметизирующего шва.

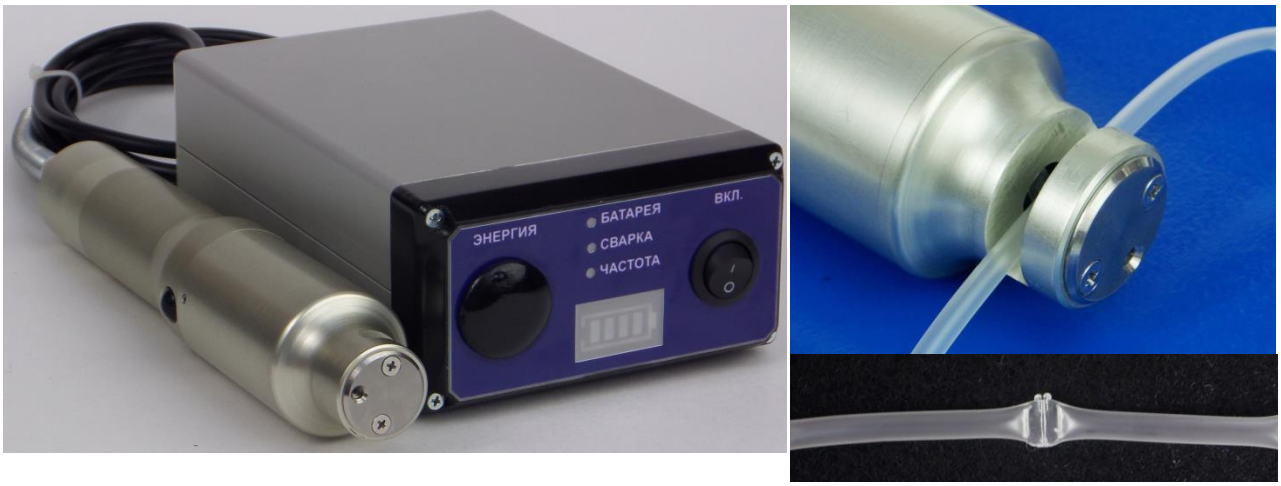
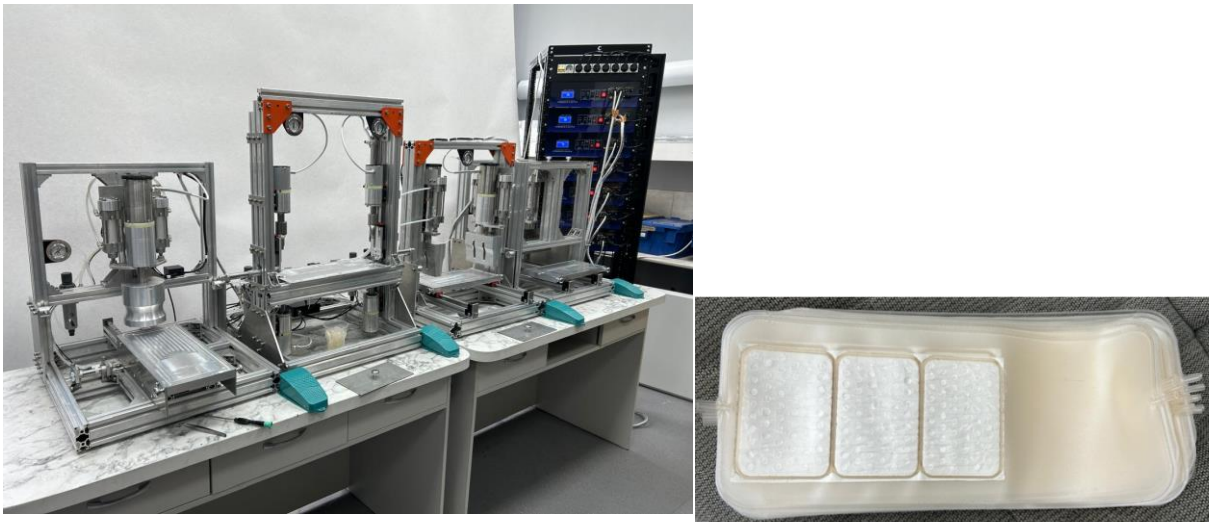


Рисунок 2 - Фото ручного автономного ультразвукового запаивателя с образцом формируемого герметизирующего шва

Автономный ультразвуковой запаиватель имеет следующие технические характеристики и особенности: область применения - службы крови, смежные отрасли; принцип сварки - ультразвуковой; частота ультразвукового воздействия - 44 кГц; тип питания - встроенный аккумулятор; режим работы – полуавтоматический; диаметр свариваемых трубок - от 3 до 5 мм; время сварки - до 2 сек; максимальное количество сварок – не менее 700; масса всего аппарата - 1000 г; масса сварочной головки - 400 г.

На рис. 3, *а* показано фото производственной линии, предназначенной для производства пластиковых контейнеров для забора и сушки компонентов крови. Линия содержит четыре независимые сварочные УЗ установки и электронные блоки управления, смонтированные на

единой стойке. При помощи созданной установки реализуются следующие операции: приваривание паропрозрачной мембраны к одной из стенок гемоконтейнера; вваривание двух диаметрально расположенных портов (штуцер для подачи/слива препаратов крови в/из гемоконтейнер) между стенками формируемого гемоконтейнера; формирование двух поперечных и двух продольных швов, образующих герметичный замкнутый периметр гемоконтейнера. На рис. 3, *б* показано фото изготовленных пластиковых пакетов для забора и сушки компонентов крови.

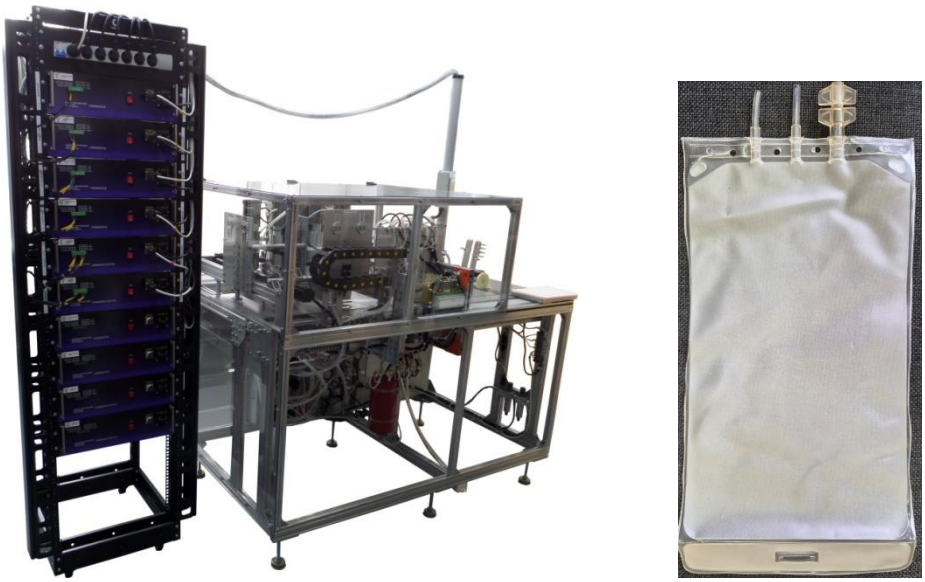


а) б)

Рисунок 3 - Фото установок для изготовления пластиковых контейнеров для забора и сушки компонентов крови

Линия, представленная на рис. 3, *а*, имеет следующие технические характеристики и особенности: тип питающей сети – однофазная 220 Вольт; суммарная потребляемая мощность (в режиме одновременной работы всех сварочных узлов) – 3000 Вт; время выполнения одной операции сварки - от 0.5 сек до 1.5 сек.; требование к пневматической сети – давление не менее 6 атм, расход сжатого воздуха 10 л/мин; количество требуемых операторов линии – от 1 до 4. Линия предназначена для работы с ПВХ материалами. Имеется возможность регулировки параметров УЗ сварки при использовании различных свариваемых материалов (время сварки, амплитуда ультразвукового воздействия, сила сжатия свариваемых материалов).

На рис. 4, *а* показано фото производственной линии, предназначенной для изготовления пластиковых контейнеров для забора и хранения компонентов крови, лекарственных препаратов и т.п. Для изготовления пластикового контейнера последовательно реализуется ряд операций, между которыми заготовки гемоконтейнера перемещаются автоматически. Расходные материалы (заготовки стенок гемоконтейнера, порты), которые используются для изготовления гемоконтейнера, оператор размещает в соответствующих позициях вручную.



а) б)

Рис. 4 Линия для производства гибких полимерных гемоконтейнеров.

Установка реализует следующие операции: вваривание портов между стенками гемоконтейнера в его верхнюю часть (количество и разновидностей портов может быть от 1 до 5); вваривание портов между стенками гемоконтейнера в его нижнюю часть (количество портов может быть от 0 до 1); формирование двух поперечных и двух продольных швов, образующих замкнутый и герметичный контур гемоконтейнера. На рис. 4, *б* показано фото одного из вариантов формируемого гемоконтейнера с установленными портами.

Установка, представленная на рис. 4, *а* имеет следующие технические характеристики и особенности: тип питающей сети – однофазная 220 вольт; суммарная потребляемая мощность (в режиме одновременной работы всех сварочных узлов) – 3000 Вт; производительность линии - 4 шт/мин; требование к пневматической сети – давление не менее 6 атм, расход сжатого воздуха 100 л/мин; количество требуемых операторов для работы с линией – один.

Заключение

Для оптимизации режимов и условий ультразвуковой сварки впервые доказано возникновение кавитационных явлений в расплавах полимеров на гарнице их соединения, что является одним из интенсифицирующих факторов, определяющих процесс формирования сварного соединения. Предложен новый способ управления процессом ультразвуковой сварки, основанный на непрерывном контроле акустических свойств соединяемых материалов в процессе формирования и развития в них кавитационных процессов. Создано и практически реализовано специализированное УЗ оборудование, предназначенное для формирования изделий из термопластичных материалов медицинского назначения, а так же ультразвуковое сварочное оборудование для непосредственного использования службами крови. Применение нового подхода к оптимизации ультразвукового воздействия обеспечило повышение качества

и надежности продукции за счет увеличения прочности формируемых соединений до 95% от прочности основного материала.

Список литературы

1. *Okhlopkova T.A., Borisova R.V., Nikiforov L.A., Spiridonov A.M., Sharin P.P., Okhlopkova A.A.* Technology of liquid-phase combination of ultra-high molecular weight polyethylene with nanoparticles of inorganic compounds under the influence of ultrasonic vibrations. // Russian Journal of Applied Chemistry..// 2016. **89**. N9. p. 1179-1186.

2. *Benatar A., Marcus M.* Ultrasonic welding of plastics and polymeric composites. Power Ultrasonics (Second Edition). 2023. p. 205-225.

3. *Unnikrishnan T.G., Kavan P.* A review study in ultrasonic-welding of similar and dissimilar thermoplastic polymers and its composites. // Materials Today Proceedings. 2015. **56**. N7. p. 3294-3300.

4. *Villegas I.F.* Ultrasonic welding of thermoplastic composites. // Frontiers in Materials. 2019. **6**. DOI: 10.3389/fmats.2019.00291.

5. *Titahun S.* A review on ultrasonic welding of various materials and their mechanical properties. // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2020. **988**, 012113.

6. *Р.В. Барсуков, Р.Н. Голых, А.Р. Барсуков, А.Н. Сливин, В.А.* Разработка модели влияния ультразвуковой энергии высокой интенсивности на реологические свойства полимерных Материалов. // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях (ИАМП-2025): Материалы XX юбилейной Всероссийской (с международным участием) научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Бийск, 22–24 октября 2025 года. – Бийск: Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова. 2025. С. 45 - 46.

7. *Барсуков Р.В., Голых Р.Н., Барсуков А.Р., Маняхин И.А.* Стенд для оптических исследований кавитационных явлений в расплавах полимеров при воздействии на них ультразвуковыми колебаниями. // Механика композиционных материалов и конструкций. 2025. **31**. N4. С. 468-478.

8. *В. Н. Хмелев, Р. В. Барсуков, Д. В. Генне* Ультразвук. Принципы построения, алгоритмы и системы управления ультразвуковыми аппаратами. Бийск: Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, 2021.

УДК: 66.069.832:66.084.8 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39674

Реализация ультразвукового распыления

В.Н. Хмелев[a], А.В. Шалунов[b], С.А. Терентьев[c]

Бийский технологический институт (филиала) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова». 659305, Алтайский край, г. Бийск, ул. Героя Советского Союза Трофимова, д. 27.

E-mail: [a]vnh@bti.secna.ru, [b]shalunov@bti.secna.ru, [c]sergey@bti.secna.ru

Аннотация: Ультразвуковое распыление обладает уникальными преимуществами, такими как высокая однородность распыления, высокая степень использования материала и высокие экономические показатели. Однако, на сегодняшний день производительность ультразвукового распыления весьма низка. Для решения этой проблемы проведены комплексные исследования полного жизненного цикла искусственно формируемых аэрозолей, которые позволяют развить физические представления, выявить новые закономерности распространения и взаимодействия аэрозольного облака с поверхностями и взвешенными частицами и разработать принципы построения аппаратурного оформления, обеспечивающего эффективное решение задач дезинфекции, пожаротушения, гидроулавливания (осаждение) пыли и других задач. На основе полученных теоретических исследований разработаны новые виды ультразвуковых аппаратов для распыления. Для уменьшения размеров формируемых частиц предложен и реализован способ многостадийного распыления, при котором происходит многократное дробление капель жидкости в поле стоячей ультразвуковой волны. Для увеличения производительности предложен и реализован гидроакустический распылитель, в котором для интенсификации процесса диспергирования на выходе жидкости из соплового отверстия в жидкости формируется кавитация. Для исключения кавитационного загрязнения распыляемых жидкостей или распыления высокотемпературных, агрессивных сред (расплавов металлов) разработаны бесконтактные УЗ излучатели, обеспечивающие диспергирование без контакта с колеблющейся поверхностью.

Ключевые слова: ультразвук, распыление, колебательная система, диспергирование.

Implementation of ultrasonic atomization

V.N. Khmelev[a], A.V. Shalunov[b], S.A. Terentiev[c]

Biysk Technological Institute (Branch) Altai State Technical University, 659305, Altai Territory, Biysk, st. Hero of the Soviet Union Trofimov, 27.

E-mail: [a]vnh@bti.secna.ru, [b]shalunov@bti.secna.ru, [c]sergey@bti.secna.ru

Abstract: Ultrasonic atomization offers unique advantages, such as high spray uniformity, high material utilization, and excellent economic performance. However, its current performance remains low. To address this issue, comprehensive studies of the full life cycle of artificially generated aerosols have been conducted. These studies have allowed for the development of physical concepts, the identification of new patterns in the propagation and interaction of aerosol clouds with surfaces and suspended particles, and the development of principles for constructing equipment that effectively addresses disinfection, fire extinguishing, dust hydro-trapping (sedimentation), and other tasks. New types of ultrasonic atomization devices have been developed based on the theoretical research. To reduce the particle size, a multi-stage atomization method has been proposed and implemented, involving multiple fragmentation of liquid droplets in the field of a standing ultrasonic wave. To increase performance, a hydroacoustic atomizer has been proposed and implemented, in which cavitation is generated at the liquid outlet from the nozzle orifice to intensify the dispersion process. To prevent cavitation contamination of sprayed liquids or the spraying of high-temperature, aggressive media (such as molten metals), contactless ultrasonic emitters have been developed that ensure dispersion without contact with the vibrating surface.

Keywords: ultrasound, atomization, vibrating system, dispersion.

PACS: 43.35.Zc

Введение

На практике используется большое количество технологических процессов, основанных на формировании аэрозолей с высокой дисперсностью капель и задаваемой производительностью. Например, в распылительной сушке это позволяет быстро и эффективно получать легко высушиваемые мелкодисперсные частицы с высокой поверхностной активностью [1], а при нанесении покрытий на большие обрабатываемые площади формирование аэрозолей обеспечивает равномерность слоя [2]. Очень высокие значения производительности распыления требуется при распылении дезинфицирующих средств на открытых пространствах и пожаротушении в закрытых помещениях.

Преимущества ультразвукового распыления в возможности создавать мелкие капли жидкости с узким распределением размеров, известная зависимость между параметрами

генератора и характеристиками получаемого распыла, а также минимальные энергозатраты на реализацию процесса [3, 4].

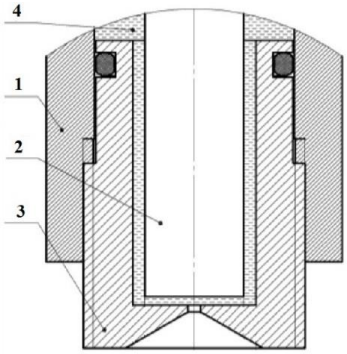
К сожалению, классическое ультразвуковое распыление (формирование камель на колеблющейся с ультразвуковой частотой поверхности) не позволяет формировать мелкие капли (средний размер в 70 мкм на частоте 22 кГц) с достаточно высокой производительностью (около 1.5 мл/(с*см^2)), или является малопроизводительным (около 0.1 мл/(с*см^2)) при повышении частоты до 200 кГц для формирования капель со средним размером 10 мкм.

Кроме того, формирование капель даже водных растворов на колеблющейся металлической поверхности излучателя приводит к загрязнению распыляемых частиц металлом, а распыление расплавов металлов или агрессивных сред просто разрушает излучатель.

Целью исследований, представленных далее, является разработка методов и оборудования, способных устранить недостатки классических способов УЗ распыления.

1 Гидроакустический распылитель

Для увеличения производительности распыления за основу взят гидравлический метод распыления, характеризующийся высокой производительностью, но не способный формировать узкий диапазон формируемых капель. Объединение преимуществ ультразвукового и гидравлического методов позволяет получать мелкодисперсные капли с высокой производительностью. Для обоснования возможности и эффективности такого способа в работе авторов [5] предложено математическое описание кавитационного распыления жидкости вблизи соплового отверстия, на основе анализа которого установлена зависимость диаметра получаемых капель жидкости от параметров УЗ воздействия и размеров распылителя. Это позволило предложить и разработать устройство, объединяющее преимущества гидравлического и ультразвукового распыления (рис. 1).



1 – технологический объем; 2 – УЗ рабочий инструмент; 3 – жиклер; 4 – распыляемая жидкость

Рис. 1. Эскиз гидроакустического распылителя

Гидроакустический распылитель представляет собой УЗ рабочий инструмент 2, располагающийся в технологическом объеме 1. Распыляемая жидкость 4 подается в

верхнюю часть технологического объема и выходит через жиклер 3, при этом отверстие жиклера находится напротив торцевой части излучателя. Жидкость в технологическом объеме находится при избыточном давлении и на выходе через отверстие жиклера испытывает воздействие УЗ колебаний от излучателя. Это обеспечивает формирование кавитационных пузырьков в каплях распыляемой жидкости. Попадая во внешнюю среду капли первичного аэрозоля за счет схлопывания кавитационных пузырьков дробятся на более мелкие. Разработка и изготовление практической конструкции распылителя с рабочей частотой УЗ излучателя 22.5 кГц и амплитудой колебаний 26 мки при диаметре отверстия жиклера 0.7 мм и расстоянии между жиклером и торцевой поверхностью УЗ рабочего инструмента 1.5 мм позволила провести экспериментальные исследования функциональных возможностей распылителя и получить зависимость размеров капель распыла от избыточного давления жидкости в технологическом объеме (рис. 2).

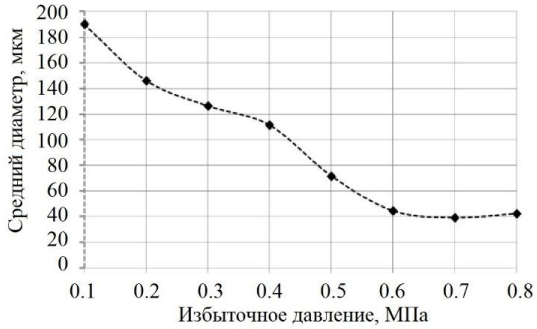


Рис. 2. Зависимость среднего размера частиц от избыточного давления в жидкости

Анализ результатов показал возможность уменьшения среднего диаметра получаемых капель с 70 мкм (для УЗ распыления) до 40 мкм при увеличении избыточного давления жидкости. При этом установлено, что увеличения давления более 0.6 МПа для реализованной амплитуды УЗ колебаний не приводит к уменьшению размеров формируемых капель. При этом было установлено, что рост давления жидкости приводит к монотонному росту производительности распыления (рис. 3). Из анализа двух выявленных зависимостей (рис. 2, 3) можно установить оптимальный режим работы гидроакустического распылителя.

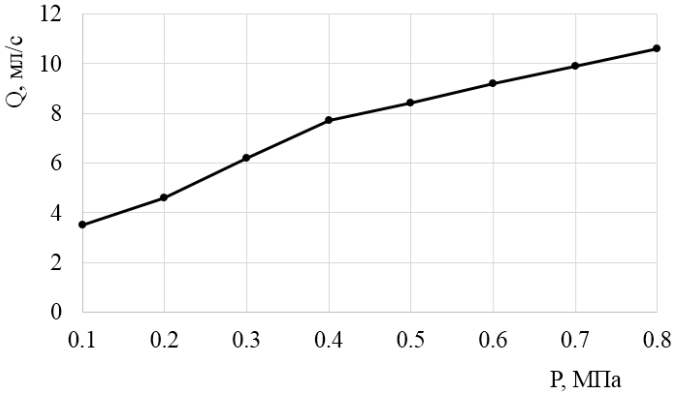


Рис. 3. Зависимость производительности распыления (Q) от давления (P)

2 Трубчатый распылитель

Для решения проблемы уменьшения размера формируемых капель без увеличения рабочей частоты излучателя предложено использовать вторичное разрушение капель жидкости в высокоинтенсивном звуковом поле. Возможность реализации такого способа основана на работе авторов [6], предложивших математическую модель процесса, которая показала возможность реализации распыления в несколько стадий за счет формирования определенных условий и значения уровня звукового давления УЗ колебаний. Это позволило предложить и разработать трубчатый распылитель с рабочей частотой 22 кГц (рис. 4).



Рис. 4. УЗ трубчатый распылитель

УЗ распылитель в виде трубчатого излучателя имеет переменный внешний и одинаковый внутренний диаметр. Внутри излучателя формируется стоячая волна, состоящая из трех максимумов с уровнем звукового давления на оси излучателя до 182 дБ.

Предварительно полученная любым известным способом аэрозоль с размерами капель 1-10 мм подается за счет потока газа внутрь трубчатого излучателя. В стоячих ультразвуковых полях аэрозоль претерпевает последовательные разрушения за счет потери устойчивости и деформации.

Были проведены эксперименты по распылению капель воды с начальным размером 1.5-2 мм при разных уровнях звукового давления на оси излучателя (рис. 5).

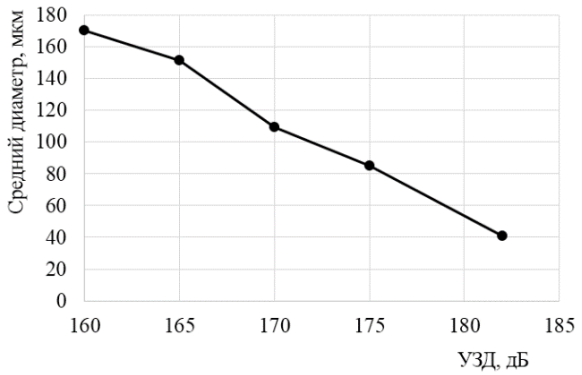


Рис. 5. Зависимость среднего диаметра аэрозоля от уровня звукового давления

Увеличение уровня звукового давления до 182 дБ позволило уменьшать средний диаметр формируемых на выходе излучателя капель до 41 мкм. Для определения производительности

формирования капель указанного размера выявлены зависимости от количества подаваемого в излучатель распыляемого материала (рис. 6)

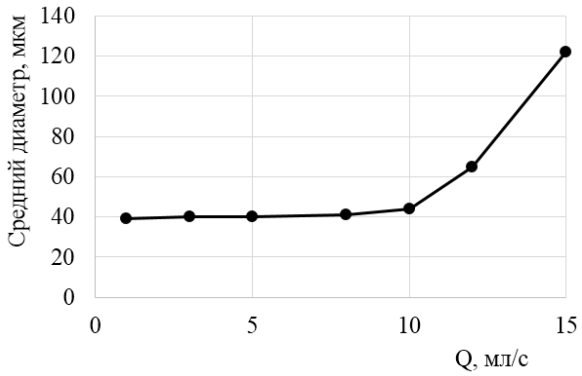


Рис. 6. Зависимость среднего диаметра капель получаемого аэрозоля от потока входящего аэрозоля (Q)

Следует отметить слабую зависимость среднего диаметра получаемых капель при потоке до 10 мл/с и стремительный рост размеров капель при дальнейшем увеличении скорости потока. Проблему видимо можно решить использованием гидроакустического излучателя (или нескольких) в качестве предварительных источников аэрозоля для последующего распыления. Основным преимуществом такого распылителя можно считать бесконтактность распыления.

Высокие интенсивности ультразвуковых колебаний и возможность бесконтактного распыления в трубчатом распылителе позволили провести эксперименты по распылению металлов. В качестве модельного образца (распыляемого металла) был использован сплав галинстан, который обладает температурой плавления 3°C, плотностью 6,4 г/см^3 и коэффициентом поверхностного натяжения 718 мН/м при температуре 20°C. Капля галинстана помещалась в область стоячей волны с уровнем звукового давления 182 дБ, где и происходило распыление. Средний диаметр полученных капель составил 53 мкм (рис. 7).

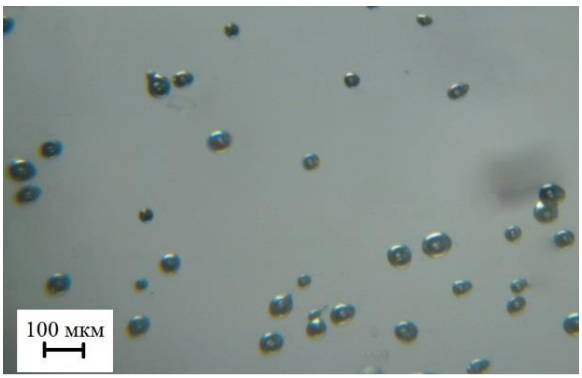


Рис. 7. Микрофотография частиц галинстана, распылённых при уровне звукового давления 182 дБ

Следует отметить что снижение уровня звукового давления до 165 дБ практически полностью исключало возможность дробления капель жидкого металла.

Заключение

В результате проведенных исследований устранены недостатки классического УЗ распыления с колеблющейся поверхности, разработаны новые виды ультразвуковых аппаратов для распыления жидких сред.

Для увеличения производительности распыления предложен и реализован гидроакустический распылитель, позволивший объединять в себе высокую производительность гидравлического метода (10 мл/с) с возможностью получения мелких капель распыла (40 мкм).

Для уменьшения размеров формируемых частиц предложен и реализован способ многостадийного распыления, при котором в поле стоячей ультразвуковой волны в трубчатом распылителе формируются частицы со средним диаметром 43 мкм при производительности 10 мл/с.

Для исключения кавитационного загрязнения распыляемых жидкостей или распыления высокотемпературных, агрессивных сред (расплавов металлов) реализовано многостадийное бесконтактное распыление металла со средним размером частиц 53 мкм.

Предложенные и реализованные способы распыления позволяют расширить возможности применения УЗ колебаний в технологических процессах.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда №23-19-00875-П.

Список литературы

1. *Nandiyanto A.B.D., Okuyama K.* Progress in developing spray-drying methods for the production of controlled morphology particles: From the nanometer to submicrometer size ranges. // Adv. Powder Technol. 2011. **22**. P. 1-19.
2. *Hanft D., Exner J., Schubert M., Stöcker T., Fuierer P., Moos R.* An overview of the aerosol deposition method: Process fundamentals and new trends in materials applications. // J. Ceram. Sci. Technol. 2015. **6**. P. 147-182.
3. *Guerra-Bravo E., Lee H.-J., Baltazar A., Loh K.J.* Vibration Analysis of a Piezoelectric Ultrasonic Atomizer to Control Atomization Rate. // Appl. Sci. 2021. **11**. P. 8350.
4. *Ramisetty K.A., Pandit A.B., Gogate P.R.* Investigations into Ultrasound Induced Atomization. // Ultrason. Sonochem. 2013. **20**. P. 254-264.
5. *Шалунов А.В., Кудряшова О.Б., Терентьев С.А., Хмелев В.Н.* Метод ультразвукового кавитационного распыления жидкостей. // Инженерно-физический журнал. 2025. **98**. № 5. С. 1294-1302.
6. *Кудряшова О.Б., Шалунов А.В., Нестеров В.А., Терентьев С.А.* Математическая модель процесса многостадийного дробления капель в ультразвуковом поле. // Инженерно-физический журнал. 2025. **98**. № 2. С. 525-534.

УДК: 534.2. DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39675

Исследование электроакустичекой эффективности пьезопреобразователей в воздухе для создания мощной многоэлементной антенной решетки

Лапина А.В.[1)], Цысарь С.А.[1)], Росницкий П.Б.[1)], Сапожников О.А.[1)]

[1)] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, г. Москва;
Тел.: +7 (495 9392952);
E-mail: lapinaav@my.msu.ru

В работе исследована электроакустическая эффективность низкочастотных (30 – 40 кГц) пьезопреобразователей двух производителей, предназначенных для создания мощных многоэлементных антенных решёток в воздухе. В качестве основного использовался метод акустической голографии, а в качестве дополнительного – метод диаграммы направленности излучателей. В голографическом методе из измеренной голограммы рассчитывался угловой спектр поля давления и с его помощью для каждой частоты находилась мощность излучаемого акустического поля при заданной амплитуде электрического напряжения, подаваемого на элементы решётки. С использованием измеренного электрического импеданса решетки при указанном значении напряжения рассчитывалась электрическая мощность. Отношение полученных значений акустической и электрической мощностей использовалось в качестве электроакустической эффективности на разных частотах. В дополнительном подходе электрическая мощность рассчитывалась аналогичным способом, а для определения акустической мощности проводились измерения диаграммы направленности ультразвуковых датчиков в диапазоне углов поворота от -90° до 90°. Оба указанных подхода позволяют измерить электроакустическую эффективность в рабочем диапазоне частот. Показано, что для исследуемых ультразвуковых датчиков в рассматриваемом диапазоне частот эффективность может достигать 40%.
Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №25-12-00141.

Ключевые слова: электроакустическая эффективность, низкочастотный ультразвук, голография, диаграмма направленности

Investigation of the electroacoustic efficiency of piezoelectric transducers in air for the development of a high-power multi-element antenna array

La**pina A.V.**[1)], **Tsysar S.A.**[1)], **Rosnitskiy P.B.**[1)], **Sapozhnikov O.A.**[1)]

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Moscow
E-mail: lapinaav@my.msu.ru

This paper investigates the electroacoustic efficiency of low-frequency (30–40 kHz) piezoelectric transducers from two manufacturers, designed for the construction of high-power multi-element antenna arrays in air. Acoustic holography was employed as the primary research method, supplemented by the directivity pattern method. In the holographic approach, the angular spectrum of the pressure field was calculated from the measured hologram and used to determine the radiated acoustic power at a specified electrical voltage amplitude applied to the array elements. The electrical power was calculated based on the measured electrical impedance of the array at the given voltage. The ratio of the obtained acoustic power to the electrical power was defined as the electroacoustic efficiency at various frequencies. In the supplementary approach, the electrical power was calculated similarly, while the acoustic power was determined by measuring the directivity patterns of the ultrasonic sensors over an angular range from -90° to 90°. Both approaches allow for the measurement of electroacoustic efficiency across the operating frequency range. It is shown that for the ultrasonic sensors under study, the efficiency can reach up to 40% within the considered frequency range.
This work was supported by the Russian Science Foundation (RSF) grant No. 25-12-00141.

Keywords: electroacoustic efficiency, low-frequency ultrasound, holography, directivity pattern
PACS: 43.35.Zc, 43.20.+g

УДК: 534-13. DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39676

Излучатели изгибного типа для генерации ультразвуковых колебаний в газовых средах

В.Н Хмелёв[1,a], А.В. Шалунов[1], С.Н. Цыганок[1]

[1] *Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Бийск, ул. Героя Советского Союза Трофимова , 27.*

E-mail: [a]vnh@bti.secna.ru

Аннотация: Формирование упругих колебаний ультразвуковой (УЗ) частоты (выше 22 кГц) в газовых средах представляет значительный практический интерес, поскольку они позволяют передавать информацию на большие расстояния в диапазоне, недоступном для восприятия человеком в сложных метеоусловиях, в условиях акустических, электромагнитных и световых помех. Кроме того, они обеспечивают очистку воздуха от твердых и жидких частиц, осаждение дыма при пожарах, позволяют выполнять низкотемпературную сушку, разрушение пен, нанесение покрытий и реализовать другие технологические операции без непосредственного контакта излучателей с обрабатываемой средой.

Основой современных УЗ излучателей для газовых сред сегодня являются металлические диски, совершающие изгибные колебания, поскольку их волновое сопротивление лучше согласуется с волновым сопротивлением газа.

Анализ колебательных процессов на второй и последующих изгибных модах позволил выявить ограничения существующих дисков и создать конструкции, обеспечившие увеличение уровня звукового давления ступенчато-переменного титанового диска диаметром 146 мм до 153.2 дБ (914 Па).

Применение передних фазовыравнивающих и тыльных отражательных рупоров позволило повысить уровень звукового давления на 6 дБ до 159.2 дБ (1824 Па).

Проведенные исследования дисковых УЗ-излучателей различных размеров подтвердили эффективность дисков, диаметром 146 мм и позволили рекомендовать применение массивов таких дисков для дальнейшего развития излучающих систем.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00900, https://rscf.ru/project/24-19-00900/.

Ключевые слова: излучатели ультразвуковые, газовые среды, уровень звукового давления.

Bending-type emitters for generating ultrasonic vibrations in gaseous media

V.N. Khmelev[1,a], A.V. Shalunov[1], S.N. Tsyganok[1]

[1] *Biysk Technological Institute (branch) Polzunov Altai State Technical University, Biysk 659305, Russia.*

E-mail: [a]vnh@bti.secna.ru

Abstract: The formation of elastic vibrations of ultrasonic (US) frequency (above 22 kHz) in gas environments is of significant practical interest, since they allow information to be transmitted over long distances in a range inaccessible to human perception in difficult weather conditions, under conditions of acoustic, electromagnetic and light interference. In addition, they provide air purification from solid and liquid particles, smoke precipitation during fires, enable low-temperature drying, foam destruction, coating application, and other technological operations without direct contact between the emitters and the medium being processed.

The basis of modern ultrasonic emitters for gaseous media today are metal disks that perform bending vibrations, since their wave impedance is better matched to the wave impedance of the gas.

An analysis of the oscillatory processes in the second and subsequent bending modes made it possible to identify the limitations of existing disks and create designs that ensured an increase in the sound pressure level of a step-variable titanium disk with a diameter of 146 mm to 153.2 dB (914 Pa).

The use of front phase-equalizing and rear reflective horns increased the sound pressure level by 6 dB to 159.2 dB (1824 Pa).

Studies of disc ultrasonic emitters of various sizes confirmed the effectiveness of 146 mm diameter discs and recommended the use of arrays of such discs for further development of radiating systems.

The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 24-19-00900, https://rscf.ru/project/24-19-00900/.

Keywords: ultrasonic emitters, gas environments, sound pressure level

PACS: 07.64.+z

Введение

Формирование упругих колебаний ультразвуковой (УЗ) частоты (выше 22 кГц) в газовых средах обеспечивает передачу информации в недоступном для восприятия человеком диапазоне, при сложных метеоусловиях, наличии радио и световых помех [1], а также позволяет осуществлять очистку воздуха от инородных частиц, осаждение дыма при

пожарах, низкотемпературную сушку пищевых, лекарственных и взрывчатых веществ, разрушение пен, нанесение покрытий и другие операции, в которых недопустимо или невозможно размещение излучателя в обрабатываемой среде. При этом, значительное увеличение эффективности УЗ воздействия достигается при использовании УЗ колебаний с уровнем звукового давления не ниже 135–145 дБ [2].

В течение многих десятилетий такие воздействия осуществлялись только газоструйными излучателями, эффективность (КПД) которых не превышала 15–20% при уровне звукового давления колебаний до 120–130 дБ. Ограничения газоструйных излучателей и необходимость повышения эффективности излучения стимулировали разработку твердотельных излучателей, использующих изгибные колебания металлических дисков, возбуждаемых пьезопреобразователями. Были созданы конструкции таких устройств, отличающихся размерами, формой, мощностью, направленностью [3].

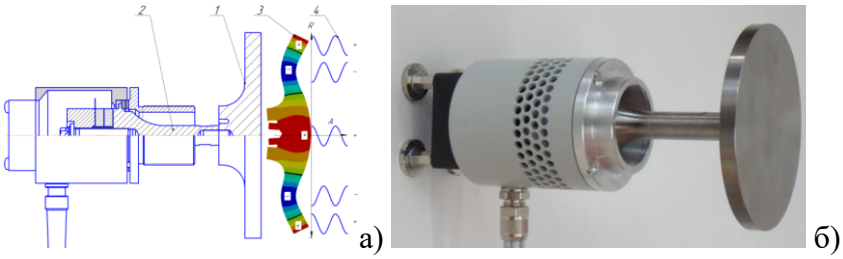
Однако, удовлетворить современные потребности по направленности и интенсивности они не всегда способны. Для повышения амплитуды колебаний, улучшения направленности, при снижении механические напряжений в материале и обеспечении равномерности колебаний по поверхности дисков [4] решались задачи выявления условий формирования УЗ колебаний с максимально возможным уровнем звукового давления и поиска конструктивных решений, обеспечивающих заданную площадь и равномерность ввода энергии в газовую среду для формирования излучения на удалении от излучателя.

1 Особенности построения и практические конструкции излучателей

Как отмечалось ранее, ключевым элементом УЗ излучателей, предназначенных для формирования УЗ колебаний в газовых средах, являются металлические диски, совершающие изгибные колебания. Это обусловлено тем, что волновое сопротивление такого излучателя лучше согласуется с волновым сопротивлением газа [5, 6].

На практике возникает необходимость использования дисковых излучателей различного диаметра. Поэтому, логичным решением задачи увеличения эффективности излучения является использование дисков большего диаметра, возбуждаемых на высших модах колебаний (второй, третьей и далее). Это позволяет увеличивать выход акустической энергии, излучаемой в газовую среду.

В связи с этим возникла необходимость разработки и исследования однотипных ультразвуковых излучателей, работающих на модах, начиная со второй. Для обеспечения максимальной эффективности излучения диска, колеблющегося на второй моде излучения был спроектирован и реализован излучатель с плоским диском диаметром 146 мм, соответствующей толщины, (рис. 1)



а – излучатель с диском диаметром 146 мм, б – внешний вид излучателя.

Рисунок 1 – Конструктивная схема, распределение колебаний и фото излучателя.

Как видно из распределения колебаний (рис. 1, а), одной из ключевых причин ограничения эффективности излучателей, работающих на высших модах, является наличие зон излучения на поверхности диска, колеблющихся в противофазе. Такие зоны излучают колебания, которые взаимно компенсируются на определенном расстоянии от излучающей поверхности, снижая суммарную энергию в рабочем объеме газа.

При этом, части диска, колеблющиеся в одной фазе, составляют 57% и 43%.

Для увеличения доли поверхности, участвующей в синфазном излучении колебаний, предложено ф**ормирование ступенчато-переменной толщины диска**, при которой высота каждой кольцевой ступени компенсирует фазовый сдвиг между соседними зонами и у**становка рупорных устройств** перед противофазно колеблющимися участками диска.

Для обеспечения излучения с одной фазой (синфазного излучения со всей поверхности) разработаны конструкции УЗ излучателей (рис. 2 и 3) с дисками различного размера, начиная со ступенчато - переменного диска диаметром 146 мм, колеблющегося на второй моде колебаний диска (рис. 2). Такое решение позволяет увеличить долю фронтальной поверхности, участвующей в синфазном излучении до 75%.

Поскольку дальнейшее увеличение площади эффективного излучения возможно только при использовании более высоких мод колебаний (третьей, четвертой и т.д.), на рис. 3 представлены фото излучателей с дисками диаметром 250, 320, 360 и 410 мм. Все они имеют переменную по радиусу толщину со стороны соединения с пьезопреобразователем, что позволяет максимально компенсировать фазовые сдвиги между зонами излучения и повысить эффективность излучения в газовую среду.

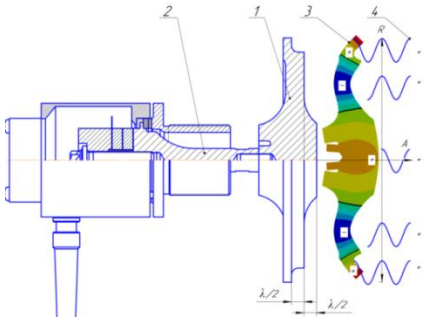


Рисунок 2 – Конструктивная схема и излучение колебаний ступенчато переменного диска диаметром 146 мм.

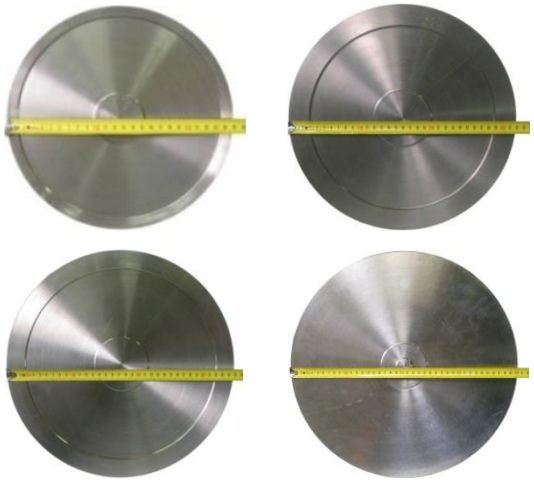


Рисунок 3 – УЗ излучатели с дисками диаметром 250, 320, 360 и 410 мм.

2 Измерение параметров излучателей и обсуждение результатов

Характеристики созданных УЗ излучателей для газовых сред приведены в Таблице 1.

Таблица 1

Технические характеристики

Диаметр диска, мм	146	250	320	360	410
Частота, кГц	22±1.85	22,5±1.85	30±2.2	29±2.3	27±2.0
Акустическая мощность, Вт	115±6	185±9	210±10	220±11	225±12
КПД, %	63	60	60	58	50
Удельная мощность Вт/см^2	0.68	0.40	0.26	0.21	0.17

Для подтверждения эффективности выполнения диска ступенчато переменным по толщине на рис. 4 представлены сравнительные диаграмма направленности двух дисков диаметром 146 мм: один из которых с плоской излучающей поверхностью (рис. 1), а второй (рис. 2) ступенчато переменный (для компенсации фазовых различий).

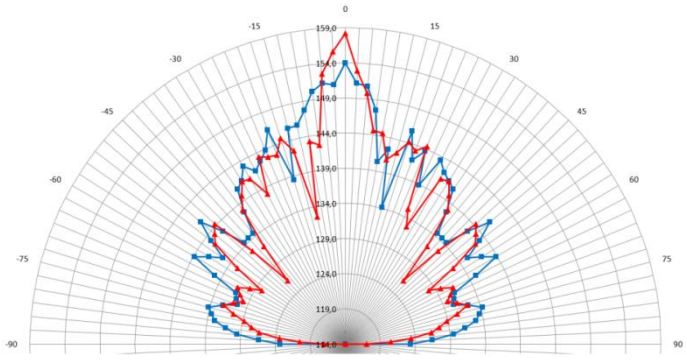


Рисунок 4 – Диаграммы направленности для двух дисков с диаметрами 146 мм – плоского (голубой) и разнотолщинного (красный).

Сравнение показывает, что уровень звукового давления плоского диска составляет 147.5 дБ (471 Па), а ступенчато-переменного – 153.2 дБ (914 Па), т.е. на 5.7 дБ больше.

Результаты измерения распределения звукового давления вдоль оси излучателя (рис. 5) свидетельствуют о том, что равномерный спад звукового давления начинается с расстояния 0.4–0.45 м (около 3 диаметров диска).

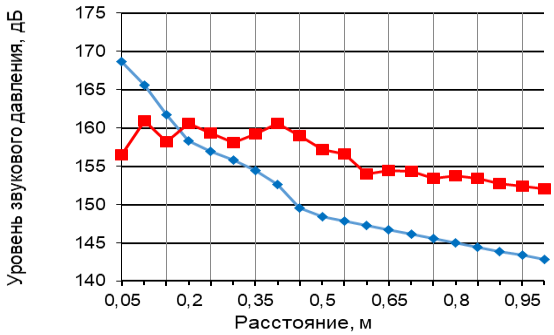


Рисунок 5 – Распределения звукового давления вдоль оси излучателя до расстояния 1 м для плоского (синий) и разнотолщинного (красный) дисков.

Диаграммы направленности излучателей с дисками диаметрами 250, 320, 360 и 410 мм, работающими на третьей, четвертой, пятой и шестой модах колебаний (рис. 6) показывают следующее: для диска диаметром 250 мм уровень звукового давления на расстоянии 1 м составляет 140 дБ (195 Па); диаметром 320 мм – 143 дБ (350 Па); диаметром 360 мм – 148 дБ (435 Па); диаметром 410 мм – 150 дБ (700 Па).

Таким образом, последовательное увеличение диаметра ступенчато переменных по толщине дисков до 250, 320, 360 и 410 мм позволяет повысить уровень звукового давления от 140 дБ (195 Па) до 150 дБ (700 Па). Однако полученные значения уступают результатам, достигнутым для диска диаметром 146 мм, работающего на второй моде. Увеличение диаметра приводит к расширению диаграммы направленности (из-за неравномерности распределения и частичной компенсации фаз колебаний отдельных колец.

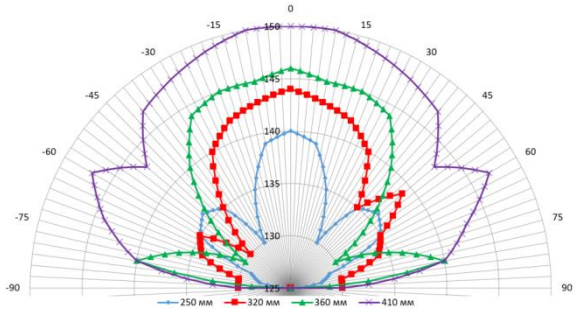


Рисунок 6 – Диаграммы направленности УЗ излучателей с дисками диаметрами 250, 320, 360 и 410 мм.

Из полученных данных следует, что увеличение диаметра диска эффективно лишь до определенного предела – в частности, до возможности работы на второй моде колебаний. Дальнейшее увеличение размеров и использование более высоких мод приводит к

замедлению роста эффективности, сопровождаемому значительными затратами на материалы, изготовление и энергообеспечение, потерей механической прочности.

Дальнейшие исследования были направлены на повышение эффективности излучателей диаметром 146 мм за счет рупорных устройств (рис. 7). Излучатель в виде плоского диска был снабжен передними фазовыравнивающими рупорами, а излучатель с профилированной ступенчато переменной поверхностью снабжался только тыльным отражателем, обеспечивающим компенсацию фаз колебаний зон обратной стороны диска.

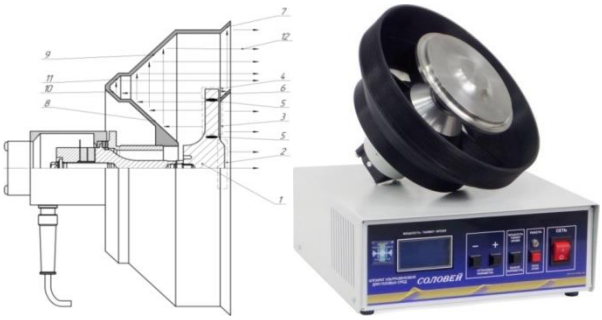


Рисунок 7 – УЗ излучатель с фазовыравнивающими рупорами.

Результаты измерения показали (рис. 8), что применение рупоров позволяет повысить эффективность излучения.

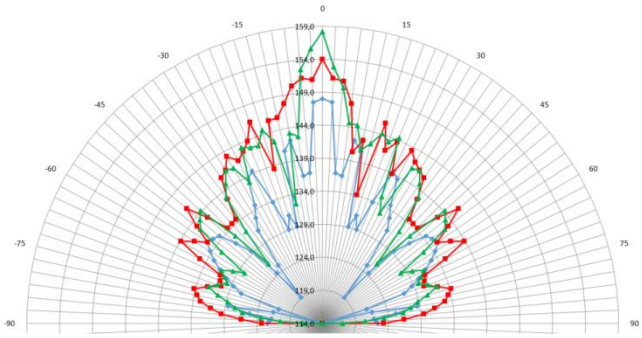


Рисунок 8 – Диаграммы направленности для дисков диаметром 146 мм (плоского – красный и разнотолщинного - зеленый) с рупорами и без них (синий).

Для плоского диска диаметром 146 мм звуковое давление возросло на 7.5 дБ до 155 дБ. Ступенчато-переменный по толщине диск того же диаметра обеспечил увеличение уровня звукового давления с 153.2 дБ (914 Па) до 159.2 дБ (1824 Па), т.е. на 6 дБ.

Заключение

1. Разработан ступенчато-переменный излучатель диаметром 146 мм, обеспечивающий излучение с уровнем звукового давления 153.2 дБ (914 Па).
2. Последовательное увеличение диаметра излучателей до 250, 320, 360 и 410 мм позволяет повышать уровень звукового давления до 150 дБ (700 Па), что уступает результатам, достигнутым для диска диаметром 146 мм.

3. Дальнейшее повышение эффективности излучения обеспечивается применением передних фазовыравнивающих и тыльных отражательных рупоров, позволяющих увеличить звуковое давление до 159.2 дБ (1824 Па), что соответствует приросту на 6 дБ.

Проведенные исследования подтвердили эффективность дисков, работающих на второй моде изгибных колебаний, а дальнейшее развитие излучающих систем может быть обеспечено созданием массивов на основе таких дисков.

Список литературы

4. *V. N. Khmelev, A. V. Shalunov, R. V. Barsukov, S. N. Tsyganok* Ultrasonic apparatus for drying. // Electronic Journal “Technical Acoustics”. 2009. 6.

5. *J. A. Gallego-Juárez, E. R-F. de Sarabia, G. RodrÍguez-Corral, Th. L. Hoffmann, J. C. Gálvez-Moraleda, J. J. RodrÍguez-Maroto, Fr. J. Gómez-Moreno, A. Bahillo-Ruiz, M. MartÍn-Espigares, M. Acha* Application of acoustic agglomeration to reduce fine particle emissions from coal combustion plants // J. Environ. Sci. Technol. 1999. 33, 3843–3849.

6. *F. Massa* Ultrasonic transducers for use in air // in Proceedings of the IEEE. Oct. 1965. **vol. 53**, no. 10. P. 1363-1371.

7. *V. N. Khmelev, V. A. Nesterov, A. V. Shalunov and S. A. Terentyev* Identification of conditions for ultrasonic effect on gas-dispersed medium and creation of radiators to increase the efficiency of coagulation in devices with swirling flow // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2024. **Vol. 335**, N. 10. P. 238–252.

8. *V. N. Khmelev, A. V. Shalunov, S. N. Tsyganok* Smoke precipitation by exposure to dual-frequency ultrasonic oscillations // Fire. 2024. **Vol. 7**, No. 12. P. 476.

9. V. *N. Khmelev, A. V. Shalunov, V.A. Nesterov* Ultrasonic transducer with increased exposure power and frequency up to 100 kHz // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2021. 68(5). P. 1773–1782.

УДК: 534-13. DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39677

Ультразвуковое разрушение дыма

В.Н.Хмелев[1], А.В.Шалунов[1], С.Н.Цыганок[1,a]

[1]Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»,

г. Бийск, ул. Героя Советского Союза Трофимова , 27.

E-mail: [a]grey@bti.secna.ru

Аннотация. Для ускорения ультразвукового (УЗ) осаждения частиц дыма было предложено и реализовано воздействие УЗ колебаниями, формируемыми одновременно несколькими (не менее двух) излучателями, работающие на частоте 22±1.65 кГц. Повышение эффективности обеспечено за счет изменения расстояния и направления акустической оси каждого излучателя для формирования заданной направленности излучения, формирования полосы формирования излучения и создания зон перекрытия акустических осей при работе излучателей на различных частотах.

Изменение межосевого расстояния между излучателями и изменение угла наклона акустической оси каждого из излучателей обеспечивает формирование УЗ поля с заданной конфигурацией и уровнем звукового давления. При перемещении УЗ излучателей и изменение угла наклона акустической оси формируются необходимые и достаточные для разрушения дыма колебания:

– на расстоянии в 1 м в виде полусферы, в которой уровень звукового давления будет не менее 145-146 дБ;

– на расстояние в 2 м в виде телесного угла (угол раскрытия 90°), в котором уровень звукового давления будет не менее 140-141 дБ.

Полученные результаты исследований свидетельствуют о возможности применения разработанного оборудования для оснащения специализированных частей средствами пожаротушения. При одновременном перемещение всего массива по замкнутому помещению будет осуществляться УЗ разрушение дыма во всем помещении.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00900, https://rscf.ru/project/24-19-00900/.

Ключевые слова: разрушение дыма, коагуляция, уровень звукового давления, двухчастотное воздействие, ультразвуковые колебания, ультразвуковой излучатель

Ultrasonic smoke destruction

V.N. Khmelev[1], A.V. Shalunov[1], S.N. Tsyganok[1,a]

[1]*Biysk Technological Institute (branch) Polzunov Altai State Technical University.*

Biysk 659305, Russia.

E-mail: [a]grey@bti.secna.ru

Abstract:To accelerate the ultrasonic (US) deposition of smoke particles, it was proposed and implemented to use ultrasonic vibrations generated simultaneously by several (at least two) emitters operating at a frequency of 22±1.65 kHz.Increased efficiency is achieved by changing the distance and direction of the acoustic axis of each emitter to form a given radiation directionality, forming a radiation formation band and creating overlapping zones of the acoustic axes when the emitters operate at different frequencies.

Changing the interaxial distance between the emitters and changing the angle of inclination of the acoustic axis of each emitter ensures the formation of an ultrasonic field with a given configuration and sound pressure level.By moving the ultrasonic emitters and changing the angle of the acoustic axis, the necessary and sufficient vibrations for the destruction of smoke are generated:

– at a distance of 1 m in the form of a hemisphere, in which the sound pressure level will be at least 145-146 dB;

– at a distance of 2 m in the form of a solid angle (opening angle 90°), in which the sound pressure level will be at least 140-141 dB.

The obtained research results indicate the possibility of using the developed equipment to equip specialized units with fire extinguishing equipment.When the entire array moves simultaneously throughout a closed room, ultrasonic destruction of smoke will be achieved throughout the entire room.

The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 24-19-00900, https://rscf.ru/project/24-19-00900/.

*Keywords:*smoke destruction, coagulation, sound pressure level, dual-frequency action, ultrasonic vibrations, ultrasonic emitter

PACS:07.64.+z

Введение

Воздействие ультразвуковыми (УЗ) колебаниями является одним из наиболее эффективных способов осаждения твердых частиц в газовых средах. Ультразвуковое воздействие на дым обеспечивает улучшение видимости за счет снижения счетной концентрации дымовых частиц,

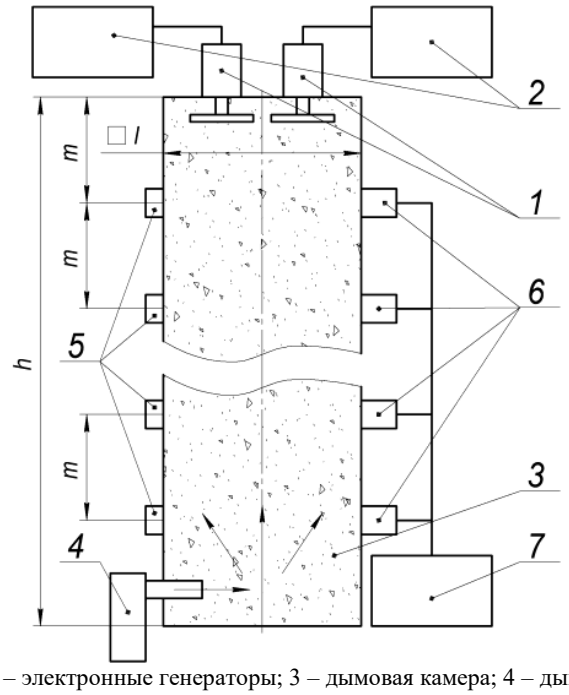
вовлекаемыхв колебательное движение,повышающее вероятность их столкновения и объединения в агломераты,существенно превосходящие поразмерам исходные дымовыечастицы. Такое объединение приводит к дальнейшему объединению игравитационному осаждению образованных агломератов [1-6].

Так как достаточно хорошо исследованное, традиционное,УЗ воздействие синусоидальными колебаниямиимеет принципиальные ограничения, дальнейшееповышение эффективности осаждения дыма следует искатьв создании новых, более эффективных условий воздействия, основанных на увеличении вероятности столкновений за счетинициирования, кроме колебательного,вращательного движения дымовых частиц.

Такое воздействие способноулучшить объединение мелких частиц за счет формирования УЗ полей сложной структуры, а одним из путей создание таких полей является излучение УЗ колебаний одновременно несколькими (минимум двумя) излучателями, работающими на близких частотах.

1 Эксперименты по ультразвуковому разрушению дыма при двухчастотном воздействии

Для подтверждения эффективности такого подхода к решению проблемы УЗ разрушения дымасоздан стенд (рис. 1) длядвухчастотного воздействия.



1 – УЗ излучатели; 2 – электронные генераторы; 3 – дымовая камера; 4 – дымогенератор; 5 – источник инфракрасного излучения; 6 – фотоприемник; 7 – ПК.

Рисунок 1 – Стенд для разрушения дыма.

Подача дыма в камеру осуществлялась с производительностью 50 л/мин. Дымовая камера имела открытые каналы для выхода продуктов, поэтому давление внутри установки не возрастало, а процесс носил проточный характер. Средний уровень звукового давления в дымовой камере составлял 145–150 дБ. Температура в дымовой камере составляла 10-12°С, при температуре окружающей среды около 5°С.

На рис. 2 приведены графики изменения коэффициента светопропускания при воздействии двумя излучателями, работающими на одной частоте (кривые 1, 2, 3),для работающих на разных частотах(кривые 4, 5, 6) и результаты естественного осаждения (кривая 7) без УЗ воздействия.

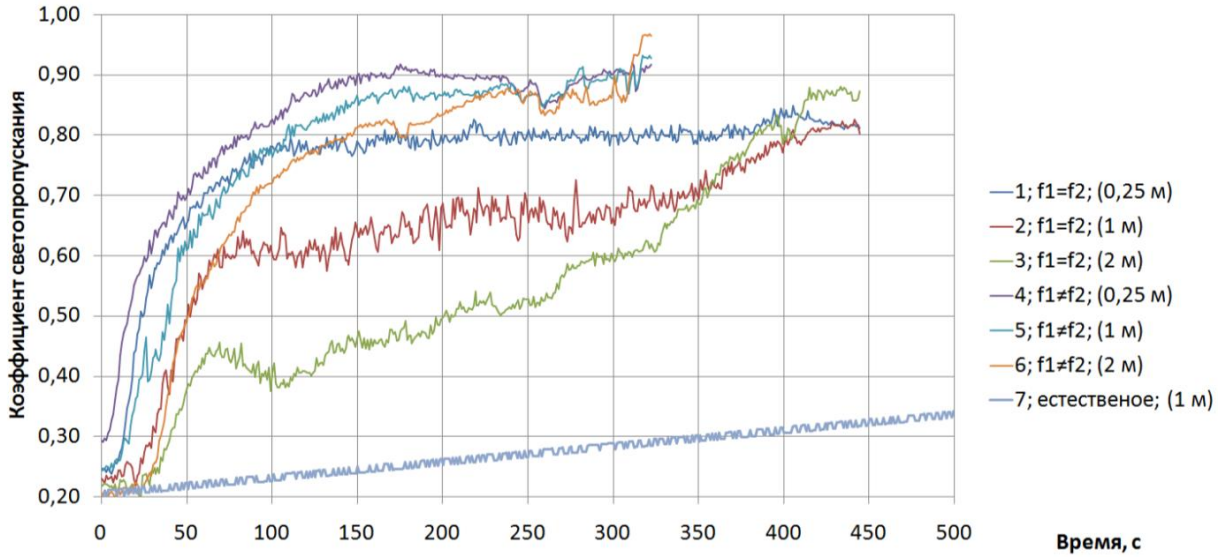


Рисунок 2 –Изменение коэффициента светопропускания от времени ультразвукового воздействия.

Коэффициент светопропускания (T) оценивался по формуле 1.

$$T = \frac{I_t}{I_0} \quad (1)$$

I_t – интенсивность излучения, прошедшая через частицы дыма; I_0 – исходная интенсивность излучения (в пустой камере, без дыма).

Двухчастотная УЗ коагуляция дыма обеспечила на расстоянии 1 м, коэффициент светопропускания 0.8, а на 2 м – 0.9 (в сравнении с одночастотным воздействием двумя излучателями 0.65 и 0.5), а при воздействии одним излучателем на расстоянии 2 м не более 0.6). Из полученных зависимостей следует, что скорость осаждения дыма увеличилась при использовании двух излучателейне менее чем в 6-7 раз при одночастотном УЗ воздействии и не менее чем в 9-11 при двухчастотном УЗ воздействиипри создании акустических полей, с равными уровнем звукового давления 145– 150 дБ. При этом, полное осаждение дыма при двухчастотном УЗ воздействии происходило до двух раз быстрее, в сравнении с УЗ

воздействием аналогичными двумя излучателями, работающими на одной частоте. Это свидетельствует об эффективности воздействия на дымы УЗполями сложной структуры.

2 Массив ультразвуковых излучателей для разрушения дыма

Для выявления условий максимально эффективногоУЗ воздействия несколькими излучателямибылипроведены исследования на специальном стенде, позволяющем измерять уровень звукового давления в закрытом помещении при изменении межосевого расстояния между дисковыми излучателями и угла наклона акустической оси (рис. 3).

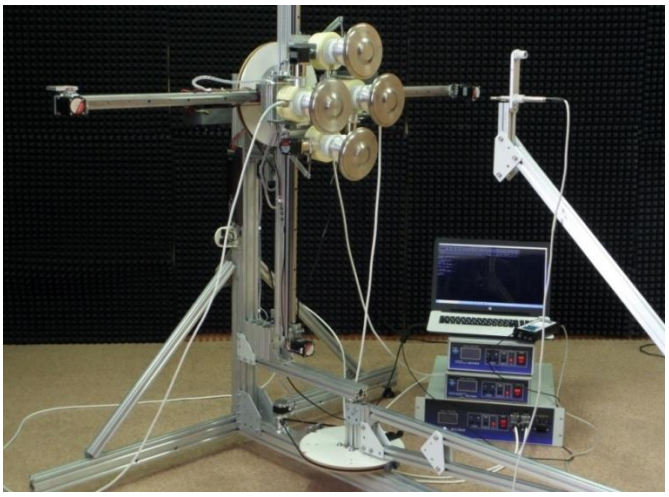
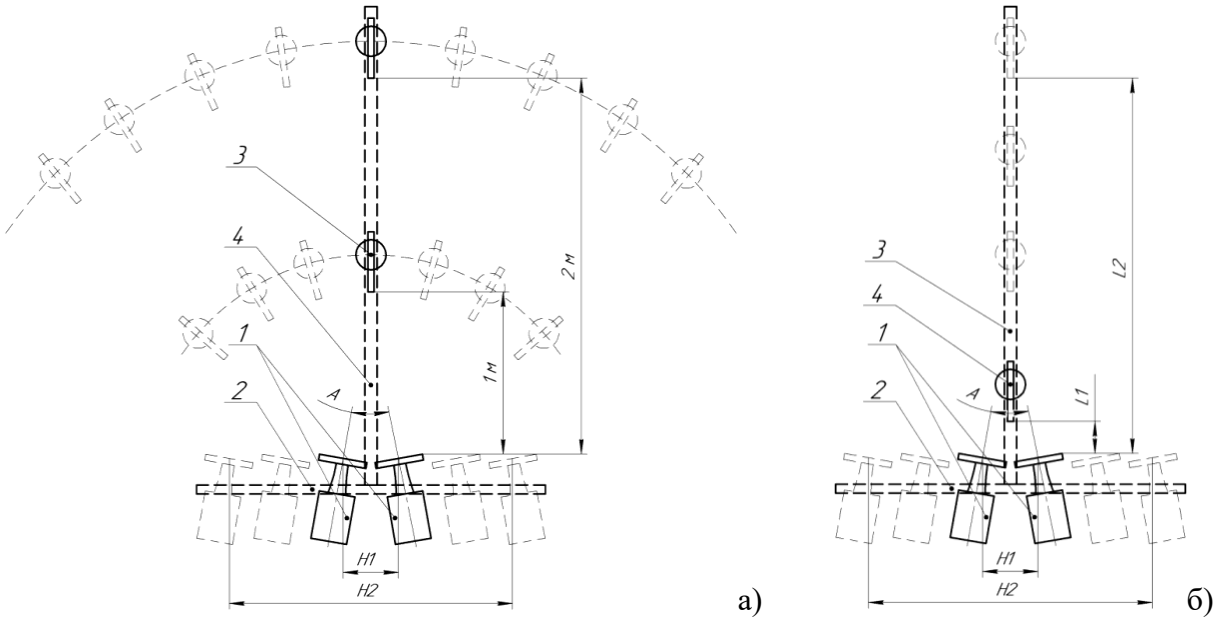


Рисунок 3 – Внешний вид измерительного стенда– с четырьмя УЗ излучателями и тремя электронными генераторами (один из них многоканальный).

На рис. 4 приведена структурная схема стенда, иллюстрирующаявозможности контроля параметров УЗ воздействия.



1 – УЗ излучатели, 2 – механизм изменения межосевого расстояния и наклона акустической оси, 3 – микрофон шумомера, 4 – стойка перемещения микрофона шумомера.

Рисунок 4 – Структурная схема стенда для измерения диаграммы направленности (а) и погонного затухания (б) при изменении межосевого расстояния между УЗ излучателями от H_1 до H_2 и угла наклона A акустических осей УЗ излучателей.

Диаграммы направленности на расстоянии в 1 м при фиксированном межосевом расстоянии в 210 мм и изменении угла наклона акустических осейУЗ излучателей приведены на рис.5. Максимальный уровень звукового давления, равный162 дБ достигалсяпри угле наклона акустическихосей в 10°.

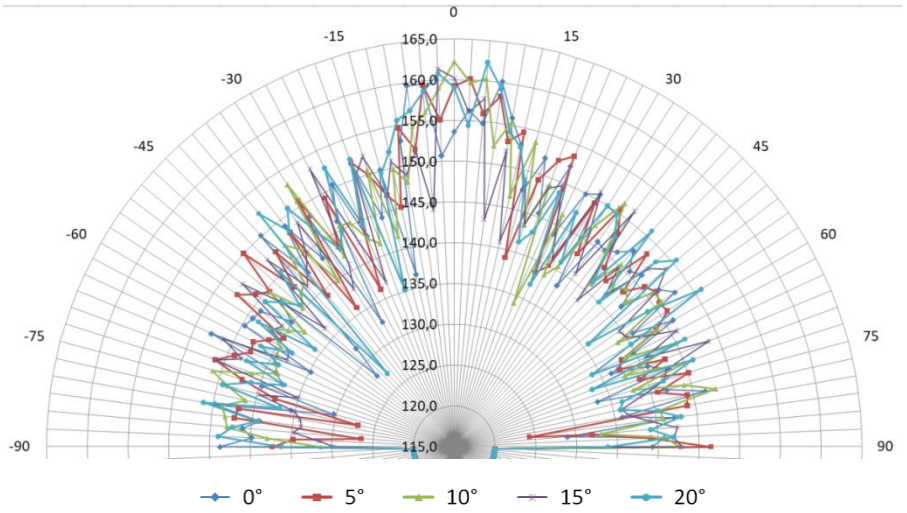


Рисунок 5 – Семейство диаграмм направленности (на расстоянии 1 м, межосевое расстояние 210 мм) при углах наклона акустических осей 0°, 5°, 10°, 15° и 20°.

При дальнейшем увеличении межосевого расстояния между УЗ излучателями увеличение уровня звукового давления отмечено не было.

Аналогичная картина наблюдалась при построении диаграммы направленности на расстоянии 2 м (рис. 6).

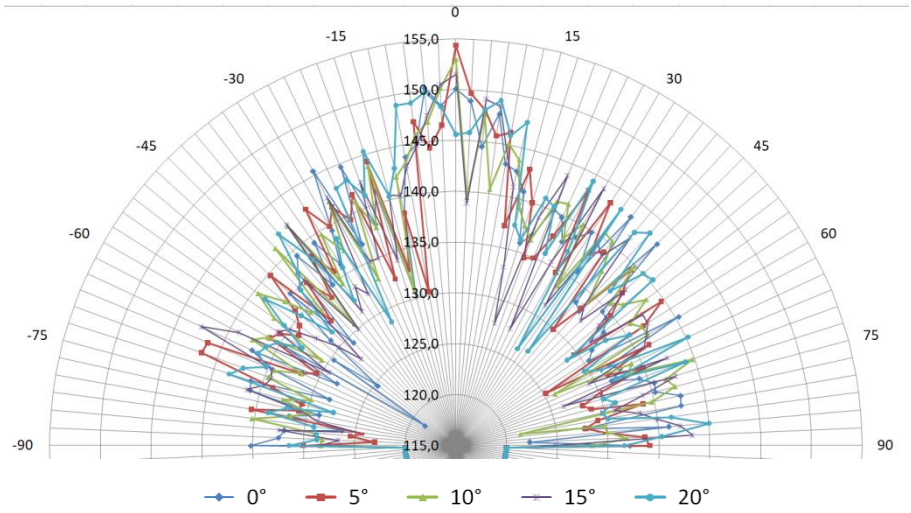


Рисунок 6 – Семейство диаграмм направленности (на расстоянии 2м, межосевое расстояние 210 мм) при углах наклона акустических осей 0°, 5°, 10°, 15° и 20°.

Максимальный уровень звукового давления достигал 154-155 дБ прирасстоянии между излучателями210 мм и при угле наклона акустической оси в 5 градусов.

На рис. 7 приведены результатыизмерения погонного затухания приизменении межосевого расстояния и фиксированного угла наклона акустических осей УЗ излучателей.

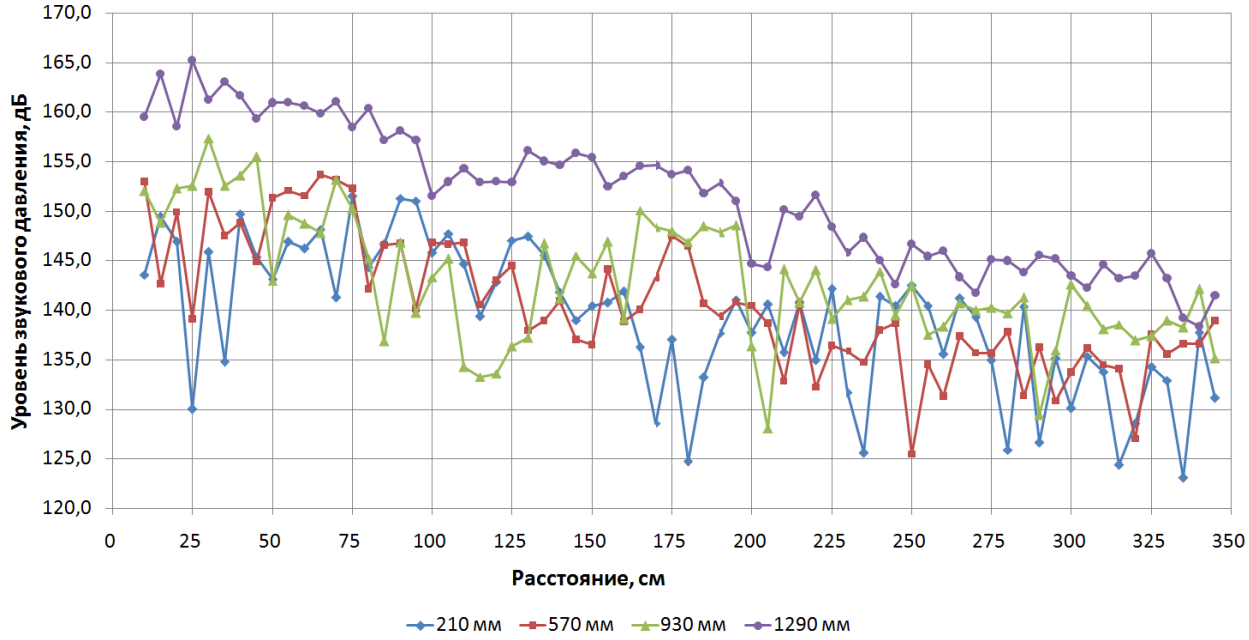


Рисунок 7 – Погонное затухание (угол наклона 0°).

Из анализа зависимостей следует, что минимальные колебания уровня звукового давления достигаются при межосевом расстояние в 1290 между УЗ излучателями.

Зависимости погонного затухания от угла наклона акустической оси УЗ излучателей обнаружено не было (рис. 8).

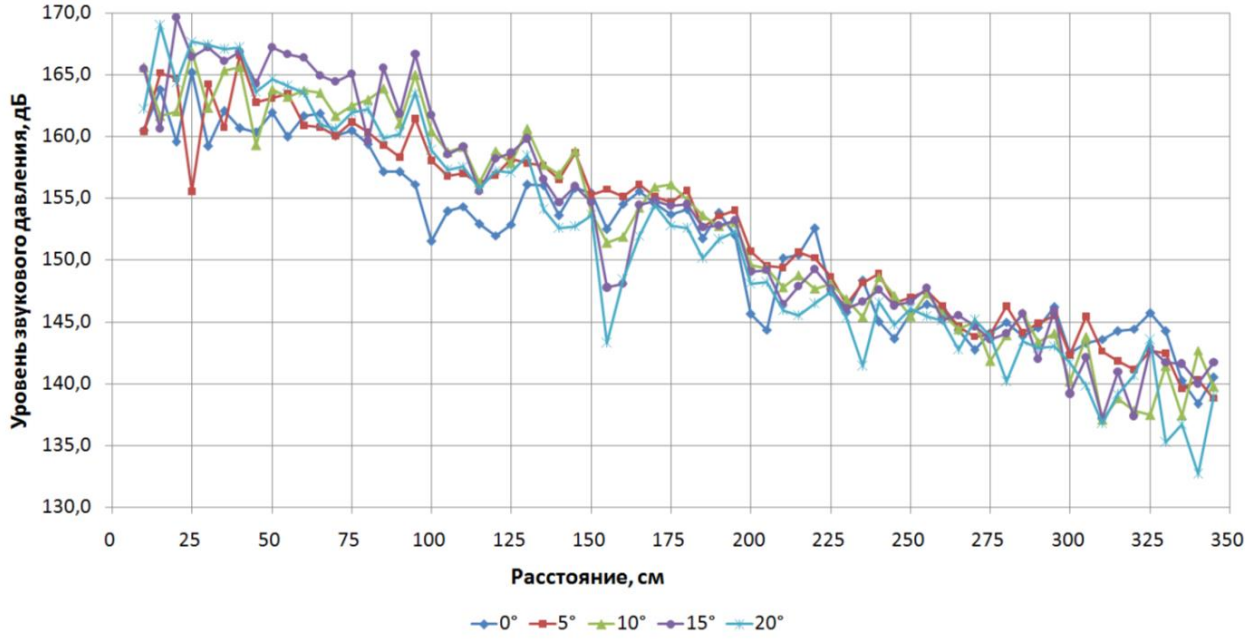


Рисунок 8 – Погонное затухание (межосевое расстояние 1290 мм).

Таким образом, можно сделать вывод о том,что,при реализации вращения массива УЗ излучателей относительно своей оси (при одновременном изменение угла наклона акустических осей и межосевого расстояния) с одновременным перемещение всего массива по замкнутому помещению будет осуществляться эффективное УЗ разрушение дыма во всем помещении.

Заключение

1. Показано повышение эффективности разрушении дыма двумя излучателями при двухчастотномУЗ воздействиемв среднем в 1.5 раза по сравнению с одночастотным.

2. Предложенмассив из четырех УЗ излучателей, позволяющий при варьировании геометрических параметров которого (изменение угла наклона акустической оси и межосевого расстояния между дисковыми излучателями) формироватьнеобходимые и достаточные для разрушения дыма колебания:

– на расстоянии в 1 м в виде полусферы, в которой уровень звукового давления будет не менее 145-146 дБ;

– на расстояние в 2 м в виде телесного угла (угол раскрытия 90 градусов), в котором уровень звукового давления будет не менее 140-141 дБ.

Список литературы

1. *Zhang, G.; Ma, Z.; Shen, J.; Zhang, K.; Wang, J.; Chi, Z.* Experimental study on eliminating fire smokes using acoustic agglomeration technology.// J. Hazard. Mater. 2019, 382, 121089, https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121089.

2. *Liu, J.; Zhang, G.; Zhou, J.; Wang, J.; Zhao, W.; Cen. K.* Experimental study of acoustic agglomeration of coal-fired fly ash particles at low frequencies. // J. Powder Technology, 2009, 193, 20–25.

3. R*iera, E.; Cardoni, A.; Gallego-Juárez, J.A.; Acosta, V.M.; Blanco, A.; Rodríguez, G.; Blasco, M.; Herranz, L.E.* Recent advances in the development and application of power plate transducers in dense gas extraction and aerosol agglomeration processes. // J. Phys. Procedia. 2015, 63, 67–72.

4. K*hmelev, V.N.; Shalunov, A.V.; Nesterov, V.A.; Terentiev, S.A.; Golykh, R.N.* Improving agglomeration efficiency of aerosols with sizes less than 2.5 μm by generation of vortex streams in inhomogeneous ultrasonic field. // Ultrasonics 2024, 142, 107376.

5. *Kuznetsov, G.V.; Piskunov, M.V.; Strizhak, P.A.* How to improve efficiency of using water when extinguishing fires through the explosive breakup of drops in a flame: Laboratory and field tests. // International Journal of Thermal Sciences, 121. 2017, 398–409.

6. V. *N. Khmelev, A. V. Shalunov, S. N. Tsyganok*Smoke precipitation by exposure to dual-frequency ultrasonic oscillations. // Fire. 2024**.** Vol. **7**, No. 12. P. 476.

УДК: 66.084.8:66.047.45 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39678

Реализация ультразвукового воздействия для сушки материалов

В.Н. Хмелев[a], А.В. Шалунов[b], С.А. Терентьев[c]

Бийский технологический институт (филиала) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова». 659305, Алтайский край, г. Бийск, ул. Героя Советского Союза Трофимова, д. 27.

E-mail: [a]vnh@bti.secna.ru, [b]shalunov@bti.secna.ru, [c]sergey@bti.secna.ru

Аннотация: Удаление влаги является важным этапом различных технологических процессов, особенно в химической, пищевой и биофармацевтической промышленности. Особое внимание уделяется решению проблемы ускорения сушки существенно отличающихся по структуре легкоокисляемых, термолабильных, биологически активных, горючих и взрывчатых веществ. Сегодня доказано, что процесс сушки при ультразвуковом (УЗ) воздействии является эффективным для различных продуктов, поскольку позволяет не только ускорять процесс, но обеспечивает улучшенное качество восстанавливаемых продуктов. Эффективность сушки ультразвуком обеспечивается за счет реализации кавитационных эффектов и капиллярного переноса влаги, что позволяет сохранять структуру и свойства капиллярно-пористых материалов. Однако, ускорение процесса 20-30% является недостаточным, а для коллоидных и коллоидных капиллярно-пористых материалов, к которым относится большая часть фармацевтических и биологически активных продуктов, ультразвуковая сушка на сегодняшний день практически не применяется. Проводимые в настоящее время исследования направлены на ускорение процессов удаления влаги за счет выявления и оптимизации условий и режимов УЗ воздействия, а также на максимальное сохранение качества и полезных свойств термолабильного и биологически активного материала. Представленные результаты исследований позволяют выявить оптимальные режимы реализации процессов сушки различных материалов, предложить и разработать их аппаратурное оформление для обеспечения промышленного применения и реализации всех преимуществ ультразвукового способа сушки.

Ключевые слова: ультразвуковые колебания, сушка, излучатель, кавитация, ультразвуковой аппарат.

Implementation of ultrasonic action for drying materials

V.N. Khmelev[a], A.V. Shalunov[b], S.A. Terentiev[c]

Biysk Technological Institute (Branch) Altai State Technical University, 659305, Altai Territory, Biysk, st. Hero of the Soviet Union Trofimov, 27.

E-mail: [a]vnh@bti.secna.ru, [b]shalunov@bti.secna.ru, [c]sergey@bti.secna.ru

Abstract: Moisture removal is a crucial step in various technological processes, particularly in the chemical, food, and biopharmaceutical industries. Particular attention is paid to accelerating the drying of readily oxidizable, heat-labile, biologically active, flammable, and explosive substances with significantly different structures. Ultrasonic drying has been proven to be effective for a variety of products, not only accelerating the process but also improving the quality of the recovered products. Ultrasonic drying is effective due to cavitation effects and capillary moisture transfer, which preserves the structure and properties of capillary-porous materials. However, a 20-30% process acceleration is insufficient, and ultrasonic drying is currently rarely used for colloidal and colloidal capillary-porous materials, which include most pharmaceutical and biologically active products. Current research is aimed at accelerating moisture removal processes by identifying and optimizing ultrasonic conditions and modes, as well as maximizing the quality and beneficial properties of heat-sensitive and biologically active materials. The presented research results allow us to identify optimal drying modes for various materials and propose and develop equipment for their industrial application and the full benefits of ultrasonic drying.

Keywords: ultrasonic vibrations, drying, transducer, cavitation, ultrasonic apparatus.

PACS: 43.35.Zc

Введение

В настоящее время наиболее доступным и распространённым способом обезвоживания влажных материалов является конвективная сушка. На ее долю приходится более 90 % промышленных сушильных процессов [1]. Нагрев материала, при конвективном способе подвода тепла значительно ограничивает его применимость для сушки легкоокисляемых, термолабильных, биологически активных, горючих и взрывчатых веществ. Такой способ сушки характеризуется рядом принципиальных недостатков – длительностью процесса, особенно при низких температурах, требует значительных энергозатрат на перевод влаги в пар, не обеспечивает равномерности сушки и, как следствие, ухудшает все полезные свойства высушиваемых материалов.

Для обеспечения высокого качества продуктов применяют и развивают другие способы сушки (лиофильная, СВЧ, инфракрасная), наиболее эффективной из которых считается лиофильная сушка. Отрицательные температуры во время сушки позволяет сохранять

свойства термолабильных материалов в целом и химико-биологические свойства биоматериалов в частности. Однако высокие энергозатраты при длительности процесса и сложность реализации лиофильной сушки существенно ограничивают ее применение.

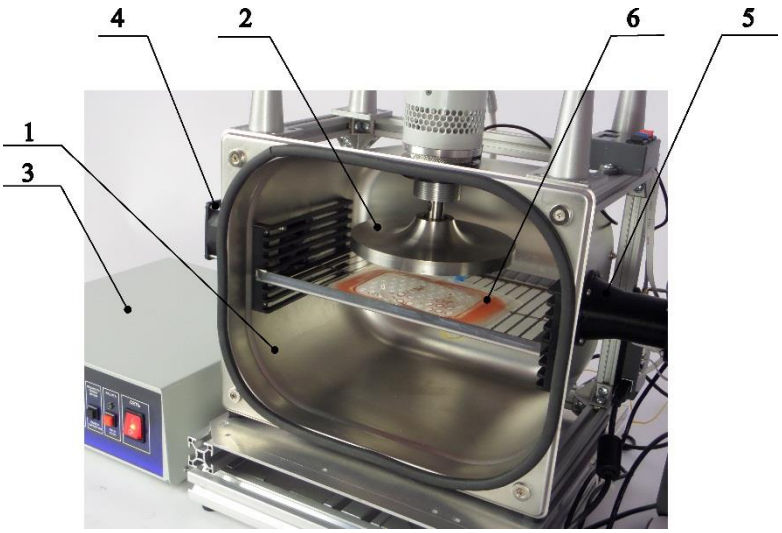
В последние годы, для решения этих проблем предлагается использовать сушку, основанную на реализации воздействия ультразвуковыми колебаниями на материалы. Такой способ хорошо зарекомендовал себя при сушке растительных материалов, содержащих активные ингредиенты, полимерных и композитных материалов [2-5]. В отличие от других, относительно новых способов воздействия на высушиваемые материалы (СВЧ, инфракрасная), ультразвуковая сушка не приводит к недопустимому повышению температуры, локальным перегревам и неравномерностям высушивания.

Энергетическая эффективность УЗ сушки подтверждена экспериментальными работами, где в качестве объектов сушки использовались капиллярно-пористые материалы. Теоретически и экспериментально доказано, что процесс бесконтактной ультразвуковой сушки осуществляется не только за счет фазового перехода жидкости в газообразное состояние, но и за счет ультразвукового диспергирования (распыления) жидкости из капилляров материала [6]. В результате анализа процессов установлено, что максимальная производительность УЗ сушки достигается в случае равенства ребер кубика высушиваемого материала длине волны УЗ колебаний в воздухе [7]. Также, в результате теоретических и экспериментальных исследований выявлено, что при уровне звукового давления менее 150 дБ процесс диспергирования практически отсутствует, а при уровне звукового давления, превышающем 170 дБ рост производительности диспергирования существенно замедляется, поскольку в части капилляров кавитационные пузырьки достигают максимального размера, равного размеру капилляра, и схлопывания не происходит. Проведенные многочисленные исследования УЗ сушки показывают снижение энергетических затрат до 1,7 раза, а продолжительность процесса до 1,9 раза, по сравнению с конвективной сушкой [7-10]. В целом, сегодня широко представлены работы по УЗ сушке фруктов, овощей и других капиллярно-пористых материалов. При этом значительно меньше исследований по УЗ сушке жидких, коллоидных биоматериалов, крови и ее компонентов.

1 Экспериментальная установка для УЗ сушки

Для лиофилизации компонентов донорской крови применяют специальные контейнеры. Контейнер представляет собой замкнутый плоский объем из гибкой паро-газо-гидронепроницаемые плёнки. В одной стенке контейнера выполнены круглые отверстия, которые закрывает гидрофобная паро-газопроницаемая мембрана из нетканого материала. Мембрана препятствует вытеканию продукта из контейнера, но пропускает пар, образующийся при сушке продукта.

Для проведения исследований по УЗ сушке коллоидных тел была разработана экспериментальная установка (рис. 1).



1 – сушильный шкаф; 2 – дисковый УЗ излучатель; 3 – УЗ генератор; 4, 5 – входной и выходной патрубки для воздуха; 6 – высушиваемый продукт с термопарой

Рис. 1. Экспериментальная установка для УЗ сушки материалов

Установка представляет собой сушильный шкаф 1 из нержавеющей стали в котором располагается УЗ дисковый излучатель 2 диаметром 146 мм. Дисковый излучатель подключен к генератору 3, который формирует электрические колебания с частотой 22 кГц. С противоположных сторон сушильного шкафа располагаются входной и выходной патрубки 5, 6 для создания потока воздуха над высушиваемым материалом 6. В нижней части контейнера прикреплена термопара. В процессе сушки шкаф закрывается прозрачной крышкой с магнитным креплением (на рис. 1 не показана).

При реализации процесса осуществляется непрерывный контроль процесса удаления влаги взвешиванием высушиваемого материала, режимов УЗ воздействия, температуры материала, влажности воздуха на входе и выходе из камеры.

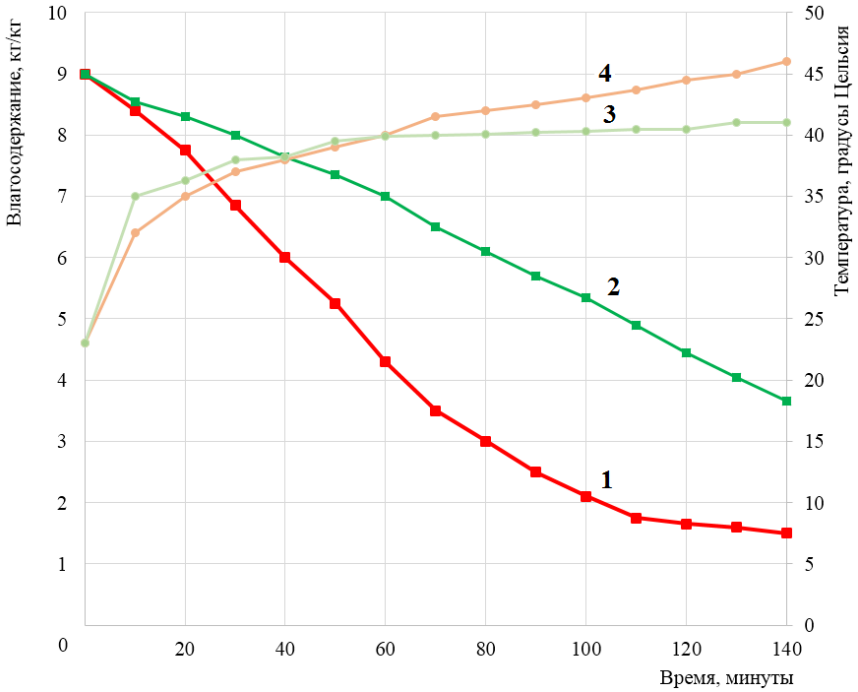
2 Результаты для обсуждения

В качестве объекта сушки было предложено использовать натуральный томатный сок массой 20 грамм, размещаемый в контейнере для сушки плазмы крови. Контейнер с томатным соком располагался мембраной вверх под излучателем, на расстоянии 30 мм от него. Внутри сушильного шкафа создавался уровень звукового давления 163±3 дБ. Скорость потока воздуха над контейнером составляла 4,0±0,2 м/с, а температура на входе составляла 23±1°C.

Полученные результаты сушки томатного сока представлены на рис. 2.

В представленных зависимостях, характеризующих процесс УЗ сушки можно выделить два периода сушки: постоянная скорость сушки (при влагосодержании продукта более 2-3 кг/кг)

и падающая скорость сушки (при влагосодержании продукта менее 2-3 кг/кг). При этом температура контейнера монотонно росла, достигнув значения 46°С. Рост температуры



1 – кривая УЗ сушки; 2 – кривая конвективной сушки; 3 – температура контейнера при конвективной сушке; 4 – температура контейнера при УЗ сушке

Рис. 2. Кинетика сушки томатного сока

высушиваемого продукта объясняется, во-первых, нагревом УЗ дискового излучателя до температуры 53°С, а во-вторых, преобразованием УЗ колебаний в тепловую энергию.

Для определения влияния повышенной температуры на процесс УЗ сушки было решено провести сравнительные испытания с использованием только конвективной сушки при входящей температуре воздушного потока 53°С, при этом скорость потока осталась неизменной. Из графиков на рис. 2 видно, что температура высушиваемого материала монотонно возрастала до 42°С. Однако продолжительность конвективной сушки томатного сока до влагосодержания 4 кг/кг составила 131 минуты. УЗ сушка позволила получить продукт с таким же содержанием влаги за 63 мин. Таким образом, скорость УЗ сушки в 2 раза превышает скорость конвективной сушки при одинаковой температуре высушиваемого продукта и скорости потока воздуха.

В результате проведенных исследований было установлено следующее:

1) при бесконтактной УЗ сушке на малых расстояниях от излучателя происходит нагрев высушиваемого продукта;

2) тепловое воздействие не является единственным механизмом УЗ воздействия, ускоряющим процесс сушки;

3) предположительно, на ускорение процесса УЗ сушки коллоидных тел в специальных контейнерах оказывают влияние следующие механизмы:

а) вибрация стенок контейнера и мембраны;

б) микропотоки у поверхности мембраны, которые уменьшают диффузионный слой;

в) проникновение УЗ колебаний через мембрану.

В результате дальнейших экспериментальных и теоретических исследований по сушке коллоидных тел в контейнерах предполагается выявить степень влияния различных механизмов на интенсификацию процесса УЗ сушки.

Заключение

Проведенные исследования на разработанной экспериментальной установке для ультразвуковой и (или) конвективной сушки материалов подтвердили эффективность и перспективность УЗ сушки коллоидных материалов.

Размещение образца материала (томатный сок) в специальном контейнере с паропрозрачной мембраной на расстоянии 30 мм от дискового излучателя, создающего УЗ колебания с уровнем звукового давления 163±3 дБ во всем объеме сушильного шкафа обеспечивало помимо нагрева, по-видимому, вибрацию стенок контейнера и мембраны, а также микропотоки у поверхности мембраны, что приводило к ускорению процесс УЗ сушки.

Результаты исследований по сушке коллоидного материала показали возможность ускорения процесса УЗ сушки в 2 раза по сравнению с конвективной при тех же условиях.

Список литературы

1. *Айнштейн В.Г., Захаров М.К., Носов Г.А.* Процессы и аппараты химической технологии. Общий курс: в 2 кн. / Под ред. В.Г. Айнштейна // 5-е изд. (эл.) М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. 1758 с.
2. *Huang D., Men K., Li D., Wen T., Gong Z., Sunden B., Wu Z.* Application of ultrasound technology in the drying of food products. // Ultrasonics sonochemistry. 2020. **63**. 104950.
3. *Wijayanti I., Sookchoo P., Prodpran T., Mohan C. O., Aluko R. E., Benjakul S.* Physical and chemical characteristics of Asian sea bass bio-calcium powders as affected by ultrasonication treatment and drying method. // Journal of Food Biochemistry. 2021. **45**(4). e13652.
4. *Hwang S., Han Y., Gardner D.J.* Characterization of CNC nanoparticles prepared via ultrasonic-assisted spray drying and their application in composite films. // Nanomaterials, 2023. **13**(22). 2928.
5. *Шалунов А.В., Хмелев В.Н., Терентьев С.А., Нестеров В.А., Голых Р.Н.* Обезвоживание пищевых продуктов под действием ультразвуковых колебаний с удалением влаги без фазового перехода. // Техника и технология пищевых производств. 2021. **51**. № 2. С. 363-373.

6. *Шалунов А.В., Хмелев В.Н., Терентьев С.А., Нестеров В.А.* Выявление режимов и условий удаления влаги из материалов бесконтактным воздействием ультразвуковых колебаний. // Инженерно-физический журнал. 2022. **95**. № 4. С. 925-933.
7. *Khmelev V., Shalunov A., Terentiev S., Golykh R., Nesterov V.* Ultrasonic dehydration of materials without liquid-vapor transition. // Drying Technology. 2024. **42**(6). P. 967-979.
8. *Kahraman O., Malvandi A., Vargas L., Feng H.* Drying characteristics and quality attributes of apple slices dried by a non-thermal ultrasonic contact drying method. // Ultrasonics Sonochemistry. 2021. **73**. 105510.
9. *Yildiz G., Gao Y., Ding J., Zhu S., Chen G., Feng H.* Enhancing physicochemical, bioactive, and nutritional properties of sweet potatoes: Ultrasonic contact drying with slot jet nozzles compared to hot-air drying and freeze drying. // Ultrasonics Sonochemistry. 2025. **112**. 107216.
10. *Xu J., Wang D., Lei Y., Cheng L., Zhuang W., Tian Y.* Effects of combined ultrasonic and microwave vacuum drying on drying characteristics and physicochemical properties of Tremella fuciformis. // Ultrasonics sonochemistry. 2022. **84**. 105963.

УДК 534.2 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39679

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЧАСТОТЫ И АМПЛИТУДЫ ПУЛЬСАЦИЙ ГАЗОВОГО ПОТОКА НА ПРОЦЕСС СУШКИ СФЕРИЧЕСКОЙ ПОРИСТОЙ ЧАСТИЦЫ

Зайнутдинова Д.А.[1a], Павлов Г.И.[2b], Горбунова О.А.[3c], Теляшов Д.А.[4d]

[1,2,3,4] КНИТУ-КАИ, г. Казань;

E-mail: [a]zajjnutdinova-dinara@mail.ru

Аннотация. В данной статье представлено экспериментально-теоретическое исследование влияния частоты и амплитуды пульсаций газового потока на процесс сушки сферической пористой частицы, в частности, керамзита. Проведены численные исследования, позволившие выявить зависимость времени удаления поверхностной и связанной влаги от параметров пульсаций воздуха. Исследования проводились на частотах, равных 50, 100, 150, 200 и 250 Гц и амплитудах колебания 0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 0,9 от средней скорости потока. Для подтверждения адекватности модели выполнены эксперименты, которые показали, что расхождение между численными результатами и экспериментальными данными не превышает 17 %. Полученные результаты позволяют оптимизировать процессы сушки пористых материалов, повышая их эффективность и сокращая энергозатраты.

Ключевые слова. Сушка, пористая частица, пульсации, частота и амплитуда, пульсирующий газовый поток.

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDY OF THE INFLUENCE OF THE FREQUENCY AND AMPLITUDE OF PULSATIONS OF A GAS STREAM ON THE DRYING PROCESS OF A SPHERICAL POROUS PARTICLE

Zainutdinova D.A.[1a], Pavlov G.I.[2], Gorbunova O.A.[3], Telyashov D.A.[4]

[1,2,3,4] KNRTU-KAI, Kazan;

e-mail: [a]zajjnutdinova-dinara@mail.ru

Abstract. This article presents an experimental and theoretical study of the effect of the frequency and amplitude of gas flow pulsations on the drying process of spherical porous particles, in particular, expanded clay. Numerical studies have been carried out to reveal the dependence of the removal time

of surface and bound moisture on the parameters of air pulsations. The studies were carried out at frequencies equal to 50, 100, 150, 200 and 250 hz and oscillation amplitudes of 0.1; 0.3; 0.5; 0.7; 0.9 of the average flow velocity. To confirm the adequacy of the model, experiments were performed, which showed that the discrepancy between the numerical results and experimental data does not exceed 17%. The results obtained make it possible to optimize the drying processes of porous materials, increasing their efficiency and reducing energy consumption.
Keywords. Drying, porous particle, pulsations, frequency and amplitude, pulsating gas flow.

Введение

Известно достаточное количество работ, как теоретических, так и экспериментальных, по исследованию взаимодействия колеблющихся газовых сред с твердыми частицами [1,2,3]. В основном, колебательные процессы рассматриваются в контексте ускорения сушки твердых увлажненных частиц. Как отмечают исследователи [1] в некоторых случаях, наложение пульсаций на среднюю скорость газового потока ускоряет процесс сушки. Но есть и работы, утверждающие об обратном. Известно, что частоты и амплитуды пульсаций скорости потока газа по разному влияют на скорость сушки. Авторы статей утверждают, что положительное воздействие пульсирующих газов на высушиваемый материал наблюдается в области высоких звуковых и ультразвуковых частот, когда как в работе [4] указывается другой диапазон частот - от 100 до 300 Гц. Несмотря на множество публикаций, в вопросах взаимодействия твёрдых дискретных частиц с пульсационными газовыми потоками остается много неясного. Например, в литературе отсутствует информация о дифференцированном влиянии параметров пульсации на поверхностную и связанную влагу. Целью данной работы является численное исследование влияния частоты и амплитуды пульсирующего газового потока на кинетику удаления влаги со сферической частицы диаметром 1 см в разные периоды сушки.

Результаты и обсуждение

До проведения численных исследований проводились предварительные расчеты с заданными исходными данными, результаты которых верифицировались путем сравнения с данными экспериментов. Эксперименты проводились на установке, которая позволяла физически воспроизвести все заданные и рассчитываемые параметры. Подробное описание такой установки приведено в работе [5]. На установке сушка частицы проводилась при следующих исходных данных: скорость газового потока – 1,8 м/с, температура воздушного потока – 120 ° С, диаметр частицы – 1 см, начальное влагосодержание частицы – 14,15%, частота пульсаций – 120 Гц, амплитуда пульсаций 0,1 (от средней скорости потока). По

экспериментальным результатам был построен график зависимости изменения влаги в частице в зависимости от времени (Рис. 1). В эту же систему координат были внесены результаты численных исследований, полученных для этих же исходных данных.



Рис. 1. Графики зависимости влагосодержания частицы от

Анализ результатов показывает, что экспериментальные данные достаточно близко располагаются к результатам численных исследований. Причем, такая картина наблюдается во всем диапазоне изменений влагосодержания. Расхождение результатов в отдельных точках не превышает 17 %. Значения конечного времени сушки, зафиксированные при расчетах и в эксперименте, идеально совпадают и равно 1400 с. На основе анализа полученных результатов можно сделать вывод, что предлагаемая модель с достаточной точностью описывает тепломассообмен между увлажненной твердой частицей и пульсирующим воздушным потоком. При заданных начальных значениях и принятых граничных условиях результаты расчетов будут достоверны. При моделировании тепломассообмена в газовом потоке с увлажненной пористой частицей были заданы следующие параметры. Диаметр частицы – 1 см, средняя скорость воздушного потока – 1,5 м/с, его температура – 150 ° С, начальная относительная влажность частицы – 19 %, конечная влажность – 1,7 %. Рассмотрены частоты пульсаций 50, 100, 150, 200, 250 Гц и амплитуды пульсаций скорости (от средней скорости потока газа) 0,1, 0,3, 0,5, 0,7, 0,9. Моделирование проводилось методом вычислительной гидродинамики в программной среде COMSOL Multiphysics. Описание математической модели приведено в [6].

Численно исследовалось влияние на сушку частицы частоты и амплитуды пульсаций скорости газа на удаление поверхностной и связанной влаги. Результаты представлены ниже в графической форме (Рис. 2-3).

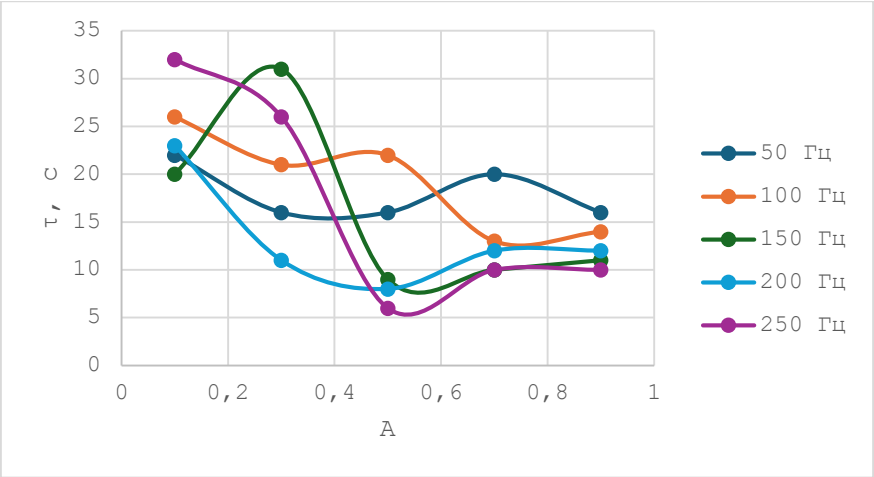


Рис. 2. Графики зависимости времени удаления поверхностной влаги от амплитуды пульсаций на разных значениях частот

Из полученных графиков функции $\tau = f(A)$, постороенных для разных частот и относящихся к поверхностной влаге (рис. 2.) следует, что режим обдува и параметры пульсационного потока в сильной степени влияют на скорость удаления влаги. В рассмотренном варианте можно выделить два наиболее эффективных режима: низкочастотный (50 Гц) и высокочастотный (150 Гц и более). Сравнение временных показателей (Рис. 2) свидетельствует, что эффективность влияния низкочастотного режима на тепломассообмен между частицей и окружающей газовой средой выше, чем при высокочастотном режиме. Необходимо также отметить, что при низкочастотном режиме на удаление поверхностной влаги тратится не более 16 с, что составляет 13 % от общего потребного времени на сушку частицы. На поверхности пористой частицы и в самой частице при обдуве газовым потоком происходят сложные физические процессы. Они до сих пор до конца не изучены. Во время быстрого порыва газа старый пограничный слой сдувается, и на его месте образуется новый, более тонкий, обеспечивая больший градиент температуры и концентрации у поверхности. Затем, пока поток замедляется, слой утолщается, но следующий импульс снова его срывает.

При исследовании влияния режимов течения воздуха на связанную влагу получены аналогичные характеристики, что и для поверхностной влаги (Рис. 3). Но полученные результаты существенно отличаются от предыдущих:

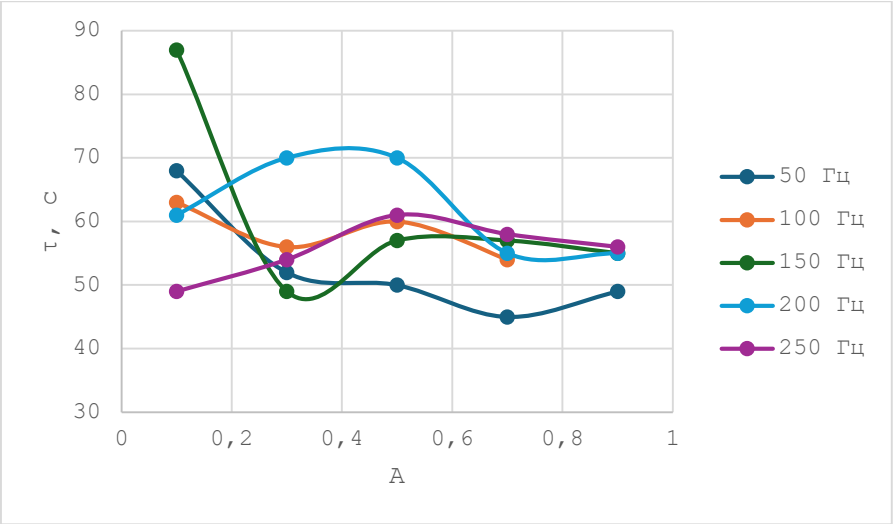


Рисунок 3 – Графики зависимости времени удаления связанной влаги от амплитуды пульсаций на разных значениях частотах

а) на удаление связанной влаги тратится почти 90 % от общего времени, когда как на поверхностную влагу - 13 %;

б) наименьшее время, затрачиваемое на удаление связанной влаги, соответствует режиму пульсационного течения газа с частотой 50 Гц и с большими амплитудами колебаний;

в) течение потока воздуха на других колебательных режимах на интенсивность удаления связанной влаги влияет мало. Предполагается, что пульсации газового потока на низких частотах и на больших амплитудах равномерно прогревают частицу за время одного цикла колебания, что создает благоприятные условия для диффузии влаги изнутри к поверхности за счет ослабления капиллярных сил внутри пор. Высокая амплитуда пульсаций газа за счет увеличения статического давления в момент торможения у поверхности частицы также может способствовать более глубокому проникновению молекул воздуха в поры, улучшая тем самым теплоотдачу и вентиляцию газовой полости.

Выводы.

1. Математические модели, разработанные для исследования тепломассообмена между увлажненной пористой твердой частицей и ламинарным подогретым воздушным потоком, движущимся в стационарном и пульсирующем режимах, адекватно описывают исследуемые процессы. Погрешность результатов расчетов по сравнению с экспериментальными данными не превышает 17 %.

2. График зависимости времени сушки от акустической мощности имеет нелинейный характер с ярко выраженными пиками и впадинами. На интенсивность сушки частицы при

обдуве пульсационным потоком влияет не только величина акустической мощности, но и значения частот и амплитуд пульсаций скорости. Замечено, что наилучший эффект достигается на малых акустических мощностях, соответствующих низким частотам колебания 50 Гц…150 Гц и амплитудам - более 0,3.

3. Режим обдува и параметры пульсационного потока в сильной степени влияют на скорость удаления поверхностной влаги. Положительный эффект наблюдается в области низких (50 Гц) и высоких частот (более 200 Гц). На частоте 50 Гц потребляемая акустическая мощность в 4..5 раз меньше, чем на высоких частотах.

4. На удаление связанной влаги большое влияние оказывает пульсационное течения газа с частотой 50 Гц и с большими амплитудами колебаний (выше 0,5).

Список литературы

1. *Жилин А.А.* Исследование процесса сушки пористых материалов при высокоинтенсивном акустическом воздействии // Инженерно-физический журнал, 2025. Т. 98, №7. С. 1949 – 1960.
2. *Хмелёв В.Н., Шалунов А.В., Терентьев С.А., Голых Р.Н., Нестеров В.А.* Выявление и исследование механизма удаления влаги из материалов при ультразвуковом бесконтактном воздействии // Инженерно-физический журнал. Т. 97, №4. С. 939 – 950. 2024.
3. *Chen Li*. Experimental investigation on drying performance of pharmaceutical granules in a pulsation-assisted fluidized bed / Li Chen, Carter Blocka, Lifeng Zhang // The Canadian Journal of Chemical Engineering. – P. 2608-2622. 2022.
4. *Зайнутдинова Д.А., Павлов Г.И., Горбунова О.А.* Экспериментально-теоретическое исследование взаимодействия сушильного агента с твердой увлажненной частицей / Сборник Трудов XXXVII сессии Российского акустического общества. – М., ООО «Издательство «ГЕОС», 2025. С. 1020-1027.
5. *Зайнутдинова Д.А., Теляшов Д.А., Накоряков П.В.* Лабораторный стенд для формирования в цилиндрической трубе газового потока с пульсационной составляющей / Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием «Актуальные проблемы механики сплошной среды — 2025», 29 сентября — 3 октября 2025 г. – Казань: Казанский ун-т, 2025. С. 214-218.
6. *Зайнутдинова Д. А., Павлов Г. И., Теляшов Д. А.* Численное исследование взаимодействия пульсирующего сушильного агента с твердой пористой увлажненной частицей // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. Том 12. № 1 (45). С. 63–80. https://doi.org/10.21684/2411-7978-2026-12-1-63-80. 2026.

УДК: 534.2. DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39680

Компьютерное моделирование и оптимизация низкочастотного трехслойного пьезопреобразователя для геофизического каротажа нефтяных скважин

А.В. Наседкин[a], А.А. Наседкина[b], М.В. Павленко[c], А.Н. Рыбянец[d]

Южный федеральный университет. 344006 г. Ростов-на-Дону, ул. Б. Садовая, 105/42.

E-mail: [a]avnasedkin@sfedu.ru , [b]aanasedkina@sfedu.ru, [c]mipa@sfedu.ru, [d]anrybyanets@sfedu.ru

Аннотация: Проведено исследование трехслойного пьезопреобразователя, разрабатываемого для акустического каротажа в нефтяных скважинах. Излучатель состоит из центральной стальной пластины и двух пьезокерамических пластин. Активные пластины выполнены из пьезокерамики ЦТС-19, поляризованы по толщине, покрыты электродами по основным граням, перпендикулярным толщине, и соединены электрически параллельно. Ставится задача оптимизации данного преобразователя по максимуму амплитуды изгибных колебаний вблизи частоты первого резонанса при варьировании толщин пластин с одинаковой подаваемой напряженностью электрического поля. Решение задачи оптимизации было осуществлено в программном комплексе ANSYS с использованием средств Mechanical APDL, Workbench и DesignXplorer. Были составлены конечно-элементные модели отдельного пьезоизлучателя и пьезоизлучателя с акустической нагрузкой, имитирующей скважинную среду. Для каждого пьезоизлучателя с принятыми геометрическими параметрами вначале из решения задачи модального анализа определялась первая частота электрического резонанса, а затем проводился расчет пьезоизлучателя в режиме установившихся колебаний на резонансной частоте как ненагруженного, так и нагруженного на акустическую среду. В результате были определены наилучшие геометрические размеры пьезоизлучателя, существенно повышающие эффективность его применения в системах акустического каротажа скважин. Численные результаты были также подтверждены экспериментально для отдельных образцов пьезоизлучателя.

Ключевые слова: пьезоэлектрический преобразователь, акустический каротаж, резонансная частота, амплитудно-частотная характеристика, компьютерное моделирование, метод конечных элементов, оптимизация

Computer modeling and optimization of low-frequency three-layer piezoelectric transducer for geophysical logging of oil wells

A.V. Nasedkin[a], A.A. Nasedkina[b], M.V. Pavlenko[c], A.N. Rybyanets[d]

Southern Federal University, 105/42 Bolshaya Sadovaya Str., Rostov-on-Don 344006, Russia.

E-mail: [a]avnasedkin@sfedu.ru , [b]aanasedkina@sfedu.ru, [c]mipa@sfedu.ru, [d]anrybyanets@sfedu.ru

Abstract: A study was conducted on a three-layer piezoelectric transducer being developed for acoustic logging in oil wells. The transducer consists of a central steel plate and two piezoelectric ceramic plates. The active plates are made of PZT-19 piezoelectric ceramic, polarized across their thickness, coated with electrodes along their main faces perpendicular to the thickness, and electrically connected in parallel. The objective was to optimize this transducer to maximize the amplitude of bending vibrations near the first resonance frequency while varying the plate thicknesses with the same applied electric field. The optimization problem was solved in the ANSYS software package using Mechanical APDL, Workbench, and DesignXplorer. Finite element models were created for a single piezoelectric transducer and a piezoelectric transducer with an acoustic load simulating a borehole environment. For each piezoelectric transducer with the adopted geometric parameters, the first electrical resonance frequency was first determined from the modal analysis problem solution, and then the transducer was calculated for steady-state oscillations at the resonant frequency, both unloaded and loaded on the acoustic medium. This resulted in the determination of the optimal geometric dimensions for the piezoelectric transducer, significantly increasing its efficiency in acoustic well logging systems. The numerical results were also confirmed experimentally for individual piezoelectric transducer samples.

Keywords: piezoelectric transducer, acoustic logging, resonant frequency, amplitude-frequency response, computer modeling, finite element method, optimization

PACS: 07.05.Tp

Введение

Одной из важнейших задач в нефтегазовой отрасли является задача поддержания и увеличения добычи углеводородов за счёт разведки и освоения новых нетрадиционных запасов с трудноизвлекаемыми ресурсами [1, 2]. Для решения этой задачи необходимо использование передового оборудования для геофизического каротажа скважин (ГИС) и применение современных методов обработки и интерпретации данных измерений. Для приборов ГИС, включающих пьезокерамические преобразователи, важнейшим этапом проектирования является предварительное компьютерное моделирование, которое может

быть эффективно проведено с использованием конечно-элементных (КЭ) технологий и соответствующих программных комплексов. Хорошо известно, что биморфные пьезопреобразователи изгибного типа, состоящие из двух пьезокерамических пластин, а также трехслойные (триморфные) пьезопреобразователи, в которых между пьезокерамическими пластинами добавлена еще металлическая пластина, широко используются в низкочастотных вибрационных приложениях [3]. Однако, по сравнению с монопольными кольцевыми преобразователями, биморфные и триморфные преобразователи генерируют, как правило, меньшее акустическое давление на низких частотах. В связи с этим, увеличение выходной мощности преобразователей является важной задачей, для решения которой могут быть применены современные методы оптимизации.

В настоящем материале доклада представлена методика исследования различных конфигураций низкочастотного триморфного изгибного пьезоизлучателя, предназначенного для акустического каротажа в нефтяных скважинах.

1 Постановка задачи

Рассматривались триморфные излучатели, состоящие из инертной центральной пластины и двух пьезокерамических пластин меньшей длины, но той же ширины, работающих в условиях акустического нагружения, имитирующего скважинную среду. Основные геометрические параметры принимались следующими: длина стальной пластины составляла L_m=134 (мм); пьезокерамические пластины имели длину L_p=100 (мм); ширина всех пластин равнялась W=37,5 (мм). Толщина как стальных, так и пьезокерамических пластин варьировалась для определения оптимальной конструкции. Центральная пластина была изготовлена из нержавеющей стали AISI 304, а пьезокерамические пластины – из пьезокерамики ЦТС-19 с материальными константами, приведенными в [4]. Пьезокерамические пластины были покрыты электродами на торцевых гранях, перпендикулярных толщине, поперечно поляризованы в одном направлении и соединены электрически параллельно. Металлическая пластина принималась жестко защемленной по торцевым граням, перпендикулярным направлению длины.

Ранее КЭ моделирование подобного пьезоизлучателя проводилось в [4] для определения его собственных частот и амплитудно-частотных характеристик (АЧХ), однако без учёта влияния акустической нагрузки. Аналитические подходы для модального анализа данного триморфа без акустической среды были описаны в [5, 6]. Здесь, следуя методологии, представленной в [7, 8], для оптимизации ключевых параметров АЧХ и для повышения эффективности триморфного излучателя под действием акустической нагрузки и без нее были проведены

вычислительные эксперименты с использованием специально разработанных программ для КЭ пакета APDL ANSYS.

В силу наличия симметрии по длине и ширине, КЭ модели строились для одной четверти пьезопреобразователя с условиями симметрии на соответствующих поверхностях. Пример такой модели показан на рис. 1 (*а*), где фиолетовым цветом изображены упругие элементы ANSYS SOLID186 металлической пластины, находящиеся в области $0 \le x \le L_m/2$, $0 \le y \le W/2$, $-h_m/2 \le z \le h_m/2$, а бирюзовым цветом – пьезоэлектрические элементы SOLID226 пьезокерамических пластин, находящиеся в областях $0 \le x \le L_p/2$, $0 \le y \le W/2$, $-h_m/2-h_p \le z \le -h_m/2$, и $h_m/2 \le z \le h_m/2+h_p$, где h_m, h_p – толщины металлической пластины и пьезокерамических пластин, соответственно, причем для рис. 1 (*а*) $h_m = h_p = 2$ (мм). На рис. 1 (*б*) в более мелком масштабе показана полная модель преобразователя в акустической среде с плотностью $\rho_a = 1 \cdot 10^3$ (кг/м^3), со скоростью звука $c_a = 1.5 \cdot 10^3$ (м/с) и с динамической вязкостью $\mu_a = 1 \cdot 10^{-3}$ (Па·с). Красным цветом на рис. 1 (*б*) представлены акустические элементы FLUID220, а синим цветом – акустические элементы FLUID220 с опцией контакта с твердотельной структурой. Радиус акустической области скважины принимался равным R_a=75 мм, а длина расчетной акустической области вдоль оси *z* бралась равной h_a=75 мм. На гранях акустической области $z = \pm h_a/2$ задавались неотражающие импедансные условия, а на радиальной границе $r = R_a$ – граничное условие твердой стенки.

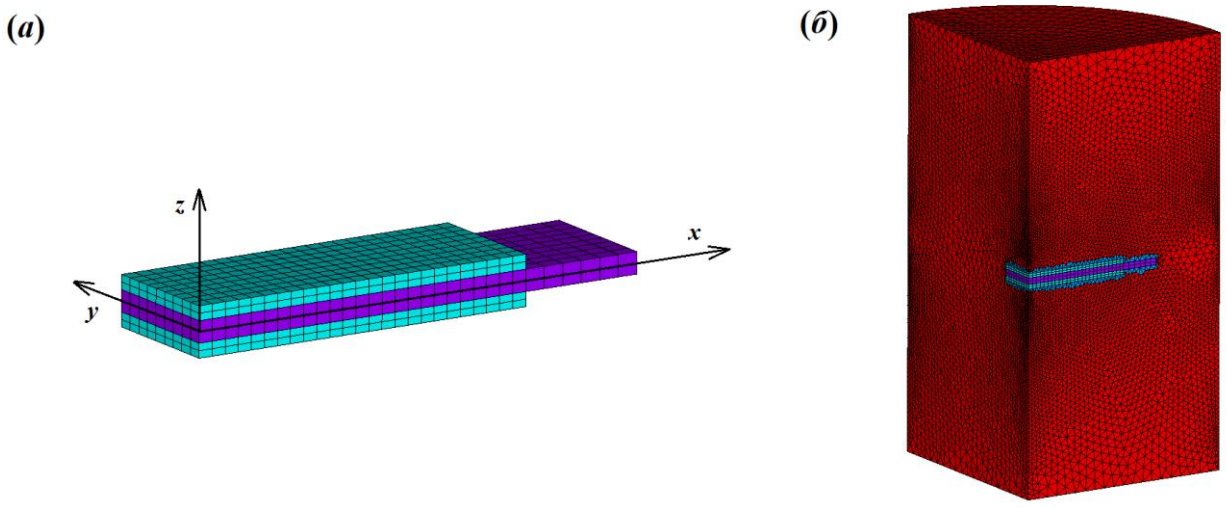


Рис. 1. КЭ модель четверти триморфа без акустической среды (*а*), КЭ сетка полной модели с учетом акустической среды (*б*)

Отметим, что здесь были выбраны конечные элементы ANSYS с промежуточными узлами, более точные, чем аналогичные элементы без промежуточных узлов, использованные для расчетов ранее в [4].

2 Методика расчетов

На первом этапе в Mechanical APDL ANSYS проводился модальный анализ ненагруженных на акустическую среду преобразователей с выбранными пограничными значениями толщин пластин h_m=1, 3 (мм), h_p=1, 3 (мм). В результате определялись первые частоты электрически активных частот резонансов f_r и антирезонансов f_a для изгибных форм колебаний. Решение этой задачи позволило выбрать частотный интервал $[f_b, f_e]$ ($f_b \le f_r \le f_e$) для построения АЧХ для максимальных перемещений в центре преобразователя при подаче на его электродированные поверхности осциллирующей разности потенциалов. Эта разность потенциалов определялась через толщину пластин h_p и значение напряженности электрического поля E_z = 10 (В/мм), которое принималось одинаковым для всех расчетов.

Далее составлялись программы на параметрическом языке APDL ANSYS для построения АЧХ преобразователя без учета акустической нагрузки и с ее учетом. Построение АЧХ осуществляется путем решения задач об установившихся колебаниях с шагом по частоте Δf в интервале частот $[f_b, f_e]$. При этом средствами APDL ANSYS из решений набора этих задач определяется максимальное смещение $u_{max} = \max|u_z|$ для всего частотного интервала. Отметим, что точность построения АЧХ зависит от числа точек по частоте, что более существенно для ненагруженного на акустическую среду пьезопреобразователя, и менее – для нагруженного. При этом для построения АЧХ преобразователей, работающих в акустической среде, требуются достаточно большие компьютерные ресурсы.

В итоге разработанные программы на языке APDL ANSYS имели входными данными толщины пластин h_m и h_p, которые принимались за переменные дизайна, а выходными – максимальные смещения u_{max}, которые определяли целевую функцию для задачи оптимизации. Дополнительное ограничение задавалось через допуск на максимальные значения амплитуд напряжений по Мизесу. Задачи оптимизации решались в ANSYS DesignXplorer, для чего созданные параметрические модели APDL интегрировались в среду ANSYS Workbench.

Обсуждение результатов и заключение

В силу ограниченности объема материалов доклада здесь обсуждается только небольшая часть полученных вычислительных результатов. Триморфный преобразователь без учета акустической среды анализировался ранее в [4], где были выбраны компромиссные значения толщин $h_m = h_p$ =2 (мм). Результаты численных расчетов для данных параметров были подтверждены сравнением с экспериментальными результатами. Новые данные оптимизационных расчетов пьезопреобразователей, работающих в акустической среде, будут представлены в докладе и в материалах отдельной расширенной статьи.

Таким образом, модальный и гармонический анализ в ANSYS позволяет оптимизировать габаритные размеры конструкции с учетом эксплуатационных требований и повысить эффективность разработанного низкочастотного триморфного излучателя для применения в системах акустического каротажа скважин, исходя из компромиссных требований максимальных смещений при изгибных колебаниях при выполнении ограничений на максимальные напряжения.

Разработанная методология компьютерного моделирования может быть использована для оптимизации конструкций различных излучателей изгибного типа в аппаратурах акустического каротажа. Дальнейшее развитие данной методологии может быть связано с проведением численных расчетов, направленных на увеличение как выходной мощности, так и полосы пропускания пьезопреобразователей.

Работа выполнена при поддержке РНФ в рамках проекта № 22-11-00302-П в Южном федеральном университете, https://rscf.ru/project/22-11-00302/.

Список литературы

1. *Adeyemi I., Meribout M., Khezzar L*. Recent developments, challenges, and prospects of ultrasound-assisted oil technologies // Ultrasonics Sonochemistry. 2022. **82**. P. 105902.
2. *Mierez J., Altammar M.J., Alruwaili K.M., Alfaraj R.T*. Recent advances of ultrasound applications in the oil and gas industry // Ultrasonics Sonochemistry. 2024. **103**. P. 106767.
3. *Zhou X., Wu S., Wang X., Wang Z., Zhu Q., Sun J., Huang P., Wang X., Huang W., Lu Q*. Review on piezoelectric actuators: materials, classifications, applications, and recent trends // Front. Mech. Eng. 2024. **19**, N. 1. P. 6.
4. *Рыбянец А.Н., Наседкин А.В., Щербинин С.А., Петрова Е.И., Швецова Н.А., Швецов И.А., Луговая М.А*. Конечно-элементное моделирование низкочастотных биморфных преобразователей для диагностики и активации нефтяных скважин // Акустический журнал. 2017. **63**, № 6. С. 685.
5. *Wu D., Dai Y., Chen H., Zhou Y., Fu L., Wang X*. Mode analysis of trilaminar bender bar transducers using an approximation method // Acoust. Phys. 2017. **63**, N 5. P. 617.
6. *Zhou Y., Wang X., Dai Y*. Studies on a piezoelectric cylindrical transducer for borehole dipole acoustic measurements // Appl. Sci. 2021. **11**, N 3. 1036.
7. *Наседкин А.В*. Моделирование пьезоэлектрических преобразователей в ANSYS: учебное пособие. Ростов-на-Дону: изд-во ЮФУ, 2015.
8. *Наседкин А.В., Наседкина А.А*. Моделирование связанных задач: математические постановки и конечно-элементные технологии. Ростов-на-Дону: изд-во ЮФУ, 2019.

УДК: 517.972.7; 539.3; 691.175 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39681

Определение упругих свойств образцов полимерных материалов, изготовленных с использованием аддитивных технологий, по характеристикам упругих волн

М.В. Голуб[1,a], К.К. Канищев[1,b], М.А. Арсенов[1,c], А.А. Еремин[1,d], А.Д. Ханазарян[1,e], О.В. Дорошенко[1,f] , С.В. Шилько[2,g], А. Панаи [3,h], И.А. Румянцев[3,k], В.А. Емельянов [3,l]

[1] *Институт математики, механики и информатики, ФГБОУ «Кубанский государственный университет», ул. Ставропольская 149, г. Краснодар, 350040, Российская Федерация.*

[2] *ГНУ «Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого Национальной академии наук Беларуси», ул. Кирова, 32 А, г. Гомель, 246050, Республика Беларусь.*

[3] *Сколковский институт науки и технологий, Большой бульвар, д. 30, стр. 1, г. Москва, 121205, Российская Федерация.*

E-mail: [a]m_golub@inbox.ru, [b]kir9kanishcheff@yandex.ru, [c]mihail2212@mail.ru, [d]eremin_a_87@mail.ru, [e]artur97.10@mail.ru, [f]oldorosh@mail.ru, [g]Shilko_mpri@mail.ru, [h]a.panayi@skoltech.ru, [k]I.Rumyantsev@skoltech.ru, [l]V.Emelianov@skoltech.ru

Аннотация: Аддитивные технологии активно внедряются в инженерную практику, позволяя быстро и с приемлемой точностью изготавливать изделия сложной геометрии. Однако прогнозирование механического поведения динамически нагруженных элементов конструкций, получаемых аддитивной переработкой полимерных расходных материалов, затрудняется из-за отсутствия достоверных значений их упругих характеристик. Традиционные методы экспериментальной механики, основанные на квазистатических испытаниях стандартных образцов, не позволяют определять динамические упругие модули. В данной работе развивается альтернативный, основанный на дисперсионном анализе волн Рэлея-Лэмба, подход к определению упругих модулей рассматриваемых полимерных материалов на образцах в виде прямоугольных пластин, изготовленных послойным наплавлением. С этой целью виброскорости точек поверхности образцов измерялись с использованием лазерной виброметрии в виде B-сканов и обрабатывались методом матричного пучка. Решение обратной задачи по определению модулей упругости осуществлялось путем минимизации невязки теоретических и экспериментальных дисперсионных соотношений для однородного изотропного волновода в пространстве его упругих характеристик. Выполненные исследования показали достаточно высокий уровень корреляции полученных значений модуля Юнга с результатами испытаний на статическое одноосное растяжение.

Ключевые слова: упругие бегущие волны, полимерные материалы, обратная коэффициентная задача, модули упругости, волны Лэмба.

Determination of elastic properties of polymer material samples manufactured using additive technologies based on elastic wave characteristics

M.V. Golub[1,a], K.K. Kanishchev[1,b], M.A. Arsenov[1,c], A.A. Eremin[1,d], A.D. Khanazarian[1,e], O.V. Doroshenko[1,f] , S.V. Shil'ko[2,g], A. Panayi[3,h], I.A. Rumyantsev[3,k], V.A. Emelyanov[3,l]

[1] *Institute for Mathematics, Mechanics and Informatics, Kuban State University, Krasnodar, 350040, Russia.*

[2] *Laboratory of Mechanics of Composites and Biopolymers, Metal-Polymer Research Institute of National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, 246050, Republic of Belarus.*

[3] *Center for Digital Engineering, Skolkovo Institute of Science and Technology, 121205 Russia.*

E-mail: [a]m_golub@inbox.ru, [b]kir9kanishcheff@yandex.ru, [c]mihail2212@mail.ru, [d]eremin_a_87@mail.ru, [e]artur97.10@mail.ru, [f]oldorosh@mail.ru, [g]Shilko_mpri@mail.ru, [h]a.panayi@skoltech.ru, [k]I.Rumyantsev@skoltech.ru, [l]V.Emelianov@skoltech.ru

Abstract: Additive manufacturing is increasingly adopted in engineering practice, enabling the fabrication of complex geometries with high precision. However, predicting the mechanical behavior of dynamically loaded components made from polymer materials often presents challenges due to the lack of precise information regarding their elastic characteristics. Traditional methods of experimental mechanics based on quasi-static testing often yield significant data scatter and do not allow for the determination of dynamic elastic moduli. This study advances an approach for determining the mechanical properties of rectangular plate specimens fabricated from polymer materials via fused deposition modeling (FDM), based on the experimental dispersion characteristics of Rayleigh-Lamb waves. To acquire these data, surface vibration velocities were measured using laser Doppler vibrometry in the form of B-scans and processed using the matrix pencil method. The inverse problem of determining elastic moduli was solved by minimizing the discrepancy between theoretical and experimental dispersion relations for a homogeneous isotropic waveguide within the elastic parameter space. The obtained estimates demonstrated a high degree of correlation with the results of static uniaxial tensile testing for Young's modulus.

Keywords: elastic guided waves, polymer materials, inverse coefficient problem, elastic moduli, Lamb waves

PACS: 43.35.Cg, 43.35.Zc

1 Введение

Значения модулей упругости полимерных материалов (пластиков), измеренные на образцах, изготовленных методом послойного наплавления (FDM), часто характеризуются значительным разбросом в зависимости от методики испытаний. При этом дисперсионные характеристики волн в упругих слоистых волноводах зависят от частоты и упругих констант материала, что позволяет восстанавливать упругие характеристики материала по волновым сигналам, измеренным в ограниченном наборе точек поверхности. В настоящем исследовании рассматривается модифицированный способ неразрушающего определения упругих характеристик слоистых волноводов, предложенный в работах [1-3], и его применение для диагностики изделий аддитивного производства. Эксперименты выполнены на образцах в виде прямоугольных пластин из полимерных материалов PET-G, SBS, HIPS, ABS, PLA. Волновые пакеты возбуждались пьезоэлектрическим преобразователем посредством короткого прямоугольного импульса, а вертикальные скорости поверхности регистрировались лазерным виброметром вдоль нескольких линий сканирования. Полученные оценки модулей упругости верифицированы путем сравнения с результатами стандартизованных механических испытаний на одноосное статическое растяжение.

2 Схема проведения экспериментальных исследований образцов

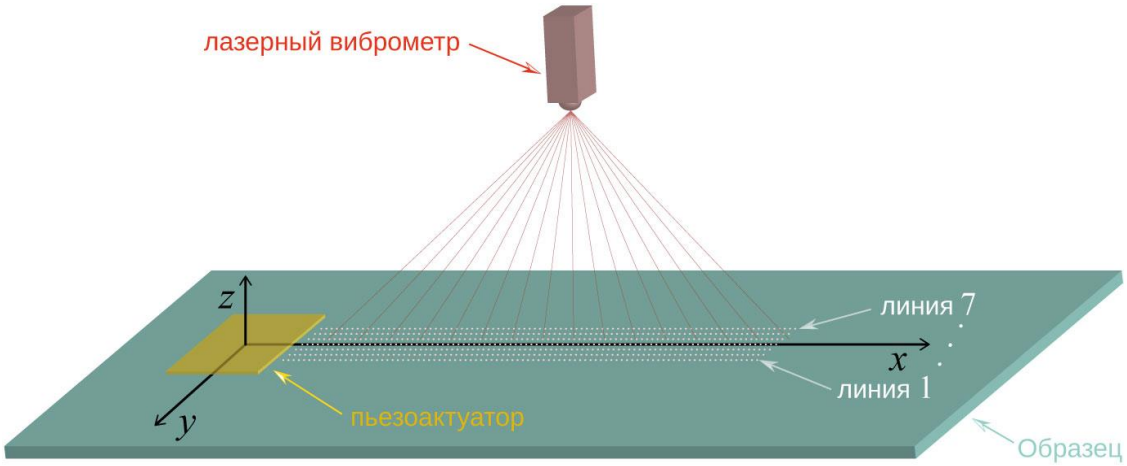


Рисунок 1. Общая схема проведения эксперимента

На первом этапе из вышеназванных пластиков методом FDM-печати на двухэкструдерном принтере Raise3D E2 были изготовлены образцы в виде прямоугольных пластин размером 150 x 40 x 3,2 мм. При печати устанавливались четыре направления заполнения: 0°, 90°, 45° и 135°. Источником бегущих упругих волн в каждом из образцов служил квадратный пьезокерамический элемент со стороной 10 мм и толщиной 0,4 мм, прикрепленный к поверхности пластины с помощью цианоакрилатного клея. Для возбуждения колебаний от генератора сигналов произвольной формы OWON XDG2030 на пьезоактуатор подавались

прямоугольные импульсы шириной 2 мкс, чтобы обеспечить достаточный частотный диапазон для последующего анализа. Схема проведения эксперимента приведена на рис. 1.

3 Обработка экспериментальных данных

Для каждого одномерного массива точек, соответствующих линиям сканирования (см. рис. 1), методом матричного пучка выполняется демодуляция массива измеренных сигналов и определяются экспериментальные медленности бегущих упругих волн, присутствующих в волновых пакетах, возбуждаемых пьезоэлектрическим актуатором и распространяющихся вдоль оси Ox.

Задача определения конечномерного вектора, составленного из двух базовых упругих характеристик изотропного материала (модуля Юнга и коэффициента Пуассона), для каждой линии сканирования решается с использованием двухступенчатого метода. На первом этапе по экспериментальным медленностям строится функционал, при составлении которого используется обращенный Фурье-образ матрицы Грина для свободного изотропного упругого волновода. На втором этапе в локальном частотном окне минимизируется расхождение между экспериментальными и расчётными медленностями. Такой подход позволяет повысить точность восстановления параметров: тестирование на синтетических данных показало двукратное снижение погрешности. При решении рассматриваемой задачи оптимизации нельзя однозначно выбрать начальное приближение, поэтому для численного решения задачи оптимизации использовался метод дифференциальной эволюции, относящийся к классу стохастических алгоритмов.

4 Численный анализ

Для верификации подхода были изготовлены три образца из одного материала (ABS-пластика), для каждого из которых применялась методика определения упругих модулей, описанная в разделе 3. Приведенные в таблице 1 значения показывают приемлемое расхождение, не превышающее 0,12 ГПа для модуля Юнга и 0,017 для коэффициента Пуассона.

Таблица 1

Упругие характеристики ABS-пластика, полученные представленным методом на трех образцах

Образец	Модуль Юнга, ГПа	Коэффициент Пуассона
А	2,187	0,337
Б	2,270	0,320
В	2,294	0,332

Для пяти выбранных полимерных материалов, физико-механические характеристики которых представлены в таблице 2, сопоставлены модули Юнга, полученные описанным

динамическим методом и посредством статических механических испытаний на одноосное растяжение с использованием высокоточного контактного экстензометра. Модули Юнга трех материалов отличаются менее, чем на 10%, а для SBS и PETG это различие составляет 16 % и 17,5 % соответственно.

Таблица 2

Физико-механические характеристики исследованных полимерных материалов

Материал	Модуль Юнга, ГПа		Плотность, кг/м^3	Коэффициент Пуассона
	Предлагаемый метод	Метод одноосного статического растяжения		
SBS	0,93	0,78	860	0,341
HIPS	2,21	2,13	1011	0,389
ABS	2,27	2,11	1013	0,320
PLA	3,77	3,44	1202	0,306
PETG	2,74	2,25	1228	0,389

Следует отметить, что при вычислении интегральной оценки исходя из оценок для каждой линии сканирования, обнаружен небольшой разброс значений. Так, лишь для одного из семи образцов оценки для семи линий отличались более, чем на 5 %, что говорит о точности «локальных» оценок упругих свойств. Интегральной оценкой, используемой для вычисления модулей упругости, служило значение многомерной медианы, определенное по всем расчетным данным с привлечением одной из метрик, приведенных в работе [5] и дающих близкие оценки (расхождение менее 1 %).

Заключение

Анализ полученных результатов показывает, что наиболее эффективная стратегия определения упругих модулей полимерных материалов – использование медианных значений по всей выборке для всех линий сканирования. Такой подход позволяет сгладить влияние единичных ошибочных измерений, вызванных локальными поверхностными или внутренними дефектами диагностируемых образцов в виде пластин или погрешностями, возникающими при проведении измерений. Перспективным видится также обобщение методики для контроля качества адгезионных соединений и структурно-функционального анализа композитов, что возможно благодаря «чувствительности» прохождения упругих волн к микроструктурным изменениям [6]. Это открывает новые диагностические возможности по выявлению внутренних дефектов (трещин и других несплошностей), а также

мониторинга деградационных изменений конструкционных материалов при воздействии различных факторов, включая воздействие радиации, атомарного кислорода и др. [7].

Исследование выполнено при финансовой поддержке Кубанского научного фонда и ООО «Орто-Маркет» в рамках проекта № НТИП-25.1/8.

Список литературы

1. *Lu L., Charron E., Glushkov E., Glushkova N., Bonello B., Julien F.H., Gogneau N., Tchernycheva M., Boyko O.* Probing elastic properties of nanowire-based structures. // Applied Physics Letters. 2018. **113**, № 16. P. 161903.
2. *Eremin A.A., Glushkov E.V., Glushkova N.V., Lammering R.* Evaluation of effective elastic properties of layered composite fiber-reinforced plastic plates by piezoelectrically induced guided waves and laser Doppler vibrometry. // Composite Structures. 2015. **125**, P. 449–458.
3. *Арсёнов М.А., Голуб М.В., Дорошенко О.В., Ерёмин А.А., Глушков Е.В., Глушкова Н.В.* Программный комплекс SIMPLE для определения упругих свойств материалов в ламинатах с помощью бегущих волн. // Вестник Южно-Уральского государственного университета, серия «Математическое моделирование и программирование». 2025. **18**, № 2. С. 66–78.
4. *Бабешко В.А., Глушков Е.В., Зинченко Ж.Ф.* Динамика неоднородных линейно-упругих сред. М.: Наука. 1989. 344 с.
5. *Dodge Y., Rousson V.* Multivariate L 1 Mean. // Advances in Data Science and Classification. 1998. P. 539–546.
6. *Golub M.V., Doroshenko O.V., Wilde M.V., Eremin A.A.* Experimental validation of the applicability of effective spring boundary conditions for modelling damaged interfaces in laminate structures. // Composite Structures. 2021. **273**, P. 114141.
7. *Шилько С.В., Дробыш Т.В., Сазанков А.П., Романович С.И.* Оценка стабильности механических свойств конструкционных углекомпозитов в условиях воздействия факторов космической среды. // Полимерные материалы и технологии. 2025. 11, № 4. С. 80–86.

УДК:539.3 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39682

Численные и натурные эксперименты по определению дисперсионных характеристик нормальных упругих волн в протяженных конструкциях сложного сечения

В.А. Емельянов[1,a], И.А. Румянцев[1], А.А. Еремин[1], А. Панаи[1]

[1]*Центр инженерных систем и наук, Сколковский институт науки и технологий.*

Москва 121205, Россия.

E-mail: [a] V.Emelianov@skoltech.ru

Аннотация: В работе исследуются дисперсионные характеристики нормальных мод в упругих волноводах сложного сечения на примере стальной двутавровой балки. Применён метод полуаналитических конечных элементов (SAFE) и проведены экспериментальные измерения с помощью сканирующей лазерной виброметрии. Показано, что возможность регистрации отдельных мод определяется расположением области сканирования относительно узловых точек собственных форм колебаний. Результаты демонстрируют хорошее согласование расчётных и экспериментальных дисперсионных кривых, что важно для оптимизации методик определения упругих свойств волноводов сложной геометрии.

Ключевые слова: бегущие упругие волны, волноводы сложного сечения, дисперсионные кривые, метод полуаналитических конечных элементов, лазерная виброметрия.

Numerical simulations and experimental studies to determine the dispersion characteristics of elastic guided waves in elongated structures of complex cross-section

V.A. Emelianov[1,a], I.A. Rumyantsev[1], A.A. Eremin[1], A. Panayi[1]

[1] *Center for Engineering Systems and Sciences, Skolkovo Institute of Science and Technology.*

Moscow 121205, Russia.

E-mail: [a] V.Emelianov@skoltech.ru

Abstract: The paper investigates dispersion characteristics of normal modes in elastic waveguides with complex cross-sections using the example of a steel I-beam. The semi-analytical finite element method (SAFE) and experimental measurements with scanning laser vibrometry are applied. It is shown that the detectability of individual modes depends on the location of the scanning line

relative to nodes and antinodes of the eigenmodes. The results demonstrate good agreement between calculated and experimental dispersion curves, which is important for optimizing methods for determining elastic properties of waveguides with complex geometry.

Keywords: elastic guided waves, waveguides with complex cross-section, dispersion curves, semi-analytical finite element method, laser vibrometry

PACS: 62.30.+d

Введение

Для расчета дисперсионных характеристик нормальных мод и соответствующих им форм колебаний в упругих волноводах сложного сечения фактически эталонным подходом стал полуаналитический метод конечных элементов (SAFE) [1,2]. В то же время задача определения экспериментальных дисперсионных кривых в соответствующих объектах, необходимых, например, как для верификации результатов SAFE-расчетов, так и служащих входными данными для решения задачи по восстановлению упругих свойств волновода в отличие от конструкций типа пластин по-прежнему является весьма нетривиальной [3]. В первую очередь это связано с особенностями локализации колебаний в сечении волновода собственных форм различных семейств нормальных волн характерных для рассматриваемых объектов.

В настоящей работе с использованием конечноэлементных расчетов и натурных измерений с применением сканирующей лазерной виброметрии анализируется взаимное влияние области приложения динамической нагрузки и расположения точек измерения относительно сечения волновода на возможность надежного определения дисперсионных кривых нормальных мод. На примере конструкции типа стальной двутавровой балки иллюстрируется прямая зависимость между особенностями локализации колебаний отдельных нормальных мод в сечении волновода и их регистрацией в экспериментальных B-сканах.

1 Компьютерная модель

Рассматриваются установившиеся гармонические колебания $\mathbf{u}(\mathbf{x})\exp(i\omega t)$ (гармонический множитель $\exp(i\omega t)$ далее опущен), $\mathbf{x}=(x,y,z)$, $\mathbf{u}=(u_x,u_y,u_z)$, упругого изотропного волновода произвольного сечения $\Omega(x,z)$, занимающего область $W=\{\mathbf{x}:(x,z)\in\Omega,\ -\infty<y<\infty\}$ (рис. 1, *a*). Компоненты вектора смещений $\mathbf{u}(\mathbf{x})$ в области W удовлетворяют системе однородных уравнений Лямэ; боковая граница $\partial W=\partial\Omega\times y$ предполагается свободной от напряжений. В этом случае вектор-функция $\mathbf{u}(\mathbf{x})$ представима в виде бегущей волны, распространяющейся вдоль оси y: $\mathbf{u}(\mathbf{x})=\mathbf{U}(x,z)\exp(-iky)$,

$\mathbf{U}(x,z)=(U_x,U_y,U_z)$, где k – волновое число. Для нахождения собственных решений соответствующей однородной краевой задачи используется метод SAFE, реализованный, в частности, в МКЭ-пакете COMSOL Multiphysics, применяемом в настоящей работе. Результатом применения SAFE для каждой фиксированной частоты колебаний $\omega=2\pi f$, где f – размерная частота, будет набор собственных чисел $k_n(\omega)$, являющихся волновыми числами распространяющихся (в случае вещественных k_n) и затухающих (для комплексных k_n) нормальных мод, и соответствующих им собственных форм $\mathbf{U}_n(x,z)$, описывающих распределение колебаний относительно сечения волновода.

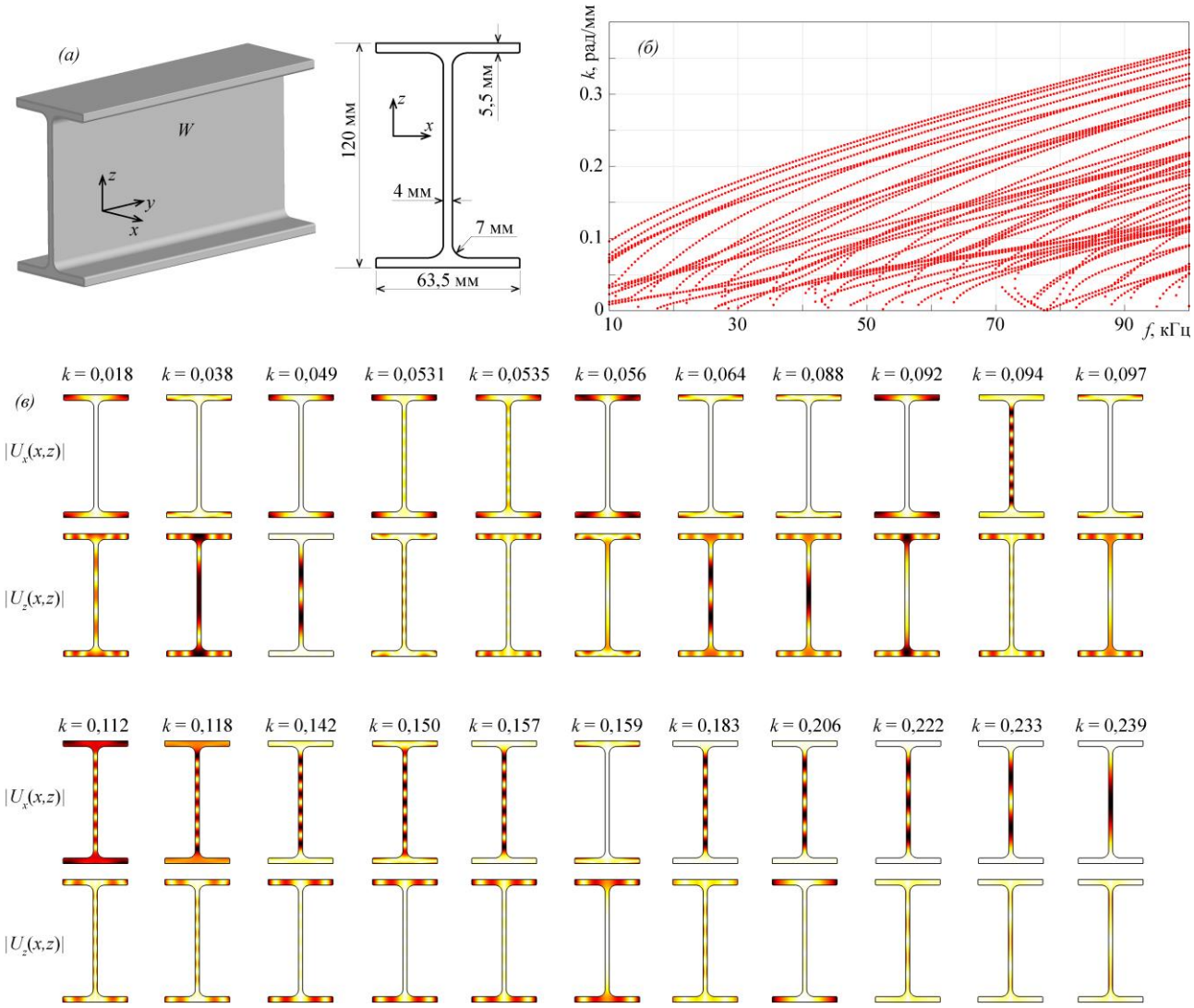


Рис. 1. Геометрия задачи (а), пример расчета дисперсионных кривых волновых чисел (б) и собственные формы локализации колебаний в сечении балки для частоты f = 50 кГц.

В качестве примера на рис. 1, *б* приводятся результаты SAFE-расчетов дисперсионных кривых волновых чисел $k_n(f)$, соответствующих незатухающим нормальным модам, для волновода типа стальной двутавровой балки 12Б1, геометрические характеристики сечения которого показаны на рис. 1, *а* (упругие характеристики материала:

модуль Юнга $E = 205$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$, плотность $\rho = 7850$ кг/м^3). В отличие от волноводов более простой формы, например, упругого слоя сопоставимой толщины, в рассматриваемом объекте даже на низких частотах колебаний распространяется значительное количество нормальных мод. Характерное поведение амплитуд горизонтальной $|U_{n,x}|$ и вертикальной $|U_{n,z}|$ компонент смещений для отдельных нормальных мод на частоте колебаний $f = 50$ кГц показано на рис. 1, *в*. Темным цветом на этих графиках выделены области, в которых амплитуды колебаний достигают своих максимальных значений. Анализ соответствующих форм колебаний позволяет условно разделить нормальные моды на два типа – к первому из них можно отнести те моды, для которых локализация колебаний наблюдается в области шейки; для мод второго типа, напротив, интенсивные смещения характерны в области полки.

2 Описание экспериментальной установки

Для экспериментального изучения особенностей распространения бегущих упругих волн в объектах сложного сечения использовался стенд на базе сканирующего лазерного виброметра Polytec PSV-500-HV (рис. 2, *а*).

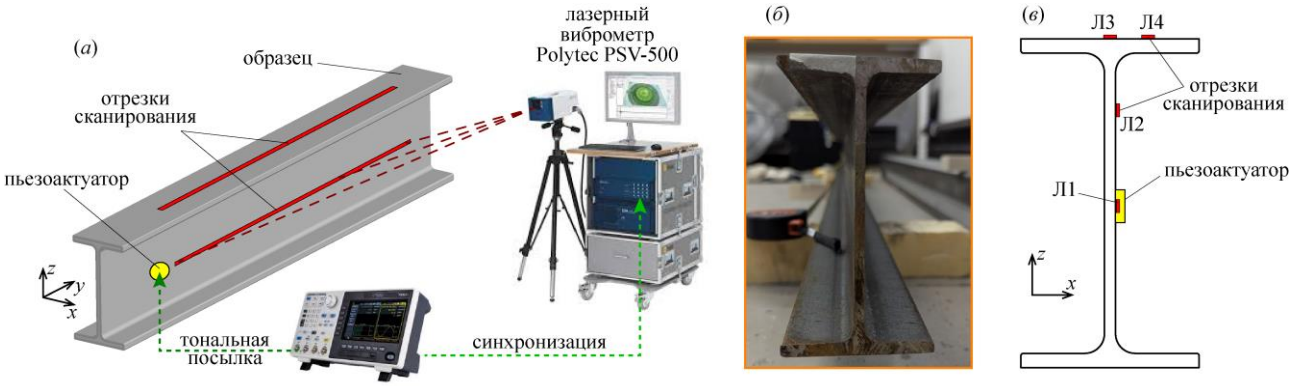


Рис. 2. Общая схема экспериментальной установки (а), фотография сечения образца (б) и расположение пьезоактуатора и отрезков сканирования относительно сечения балки (в).

В качестве образца рассматривался отрезок двутавровой балки типа 12Б1, изготовленной из стального сплава Ст3, длиной 2 м (рис. 2, *б*). Для возбуждения упругих колебаний использовался пьезокерамический диск круглой формы диаметром 12 мм и толщиной 2 мм, установленный посередине шейки балки с помощью цианакрилатного клея. Электрическая тональная посылка с амплитудой 20 В в виде прямоугольного импульса длительностью 10 мкс, подаваемая на пьезоэлемент, формировалась генератором сигналов произвольной формы OWON XDG 2030. Регистрация нормальной компоненты скорости смещений осуществлялась лазерным виброметром на протяженных наборах точек (длина каждого отрезка сканирования не менее 1 м, шаг сканирования – не более 3 мм), расположенных на

различных участках поверхности балки и ориентированных вдоль ее оси, сонаправленной с осью *Oy* введенной выше системы координат (на рис. 2, *в* обозначены как Л1-Л4).

Для извлечения экспериментальных дисперсионных кривых из полученных B-сканов к ним применялось двойное преобразование Фурье по временной и пространственной координатам [4]. Результатом такого частотно-волнового анализа является функция $H(k, f)$ переменных частоты f и волнового числа k, на поверхности модуля $|H(k, f)|$ которой дисперсионные кривые проявляются в виде локальных максимумов, выстраивающихся вдоль соответствующих траекторий.

3 Полученные результаты и их обсуждение

Результаты сопоставления теоретических и экспериментальных дисперсионных кривых для отрезков сканирования Л1 и Л2, расположенных на шейке образца, приводятся на рис. 3. Здесь точками обозначены теоретические значения $k_n(f)$, а темные области соответствуют локальным максимумам поверхности $|H(k, f)|$, полученной из экспериментов. Наблюдается хорошая качественная согласованность между расчетными и экспериментальными частотными зависимостями волновых чисел $k_n(f)$.

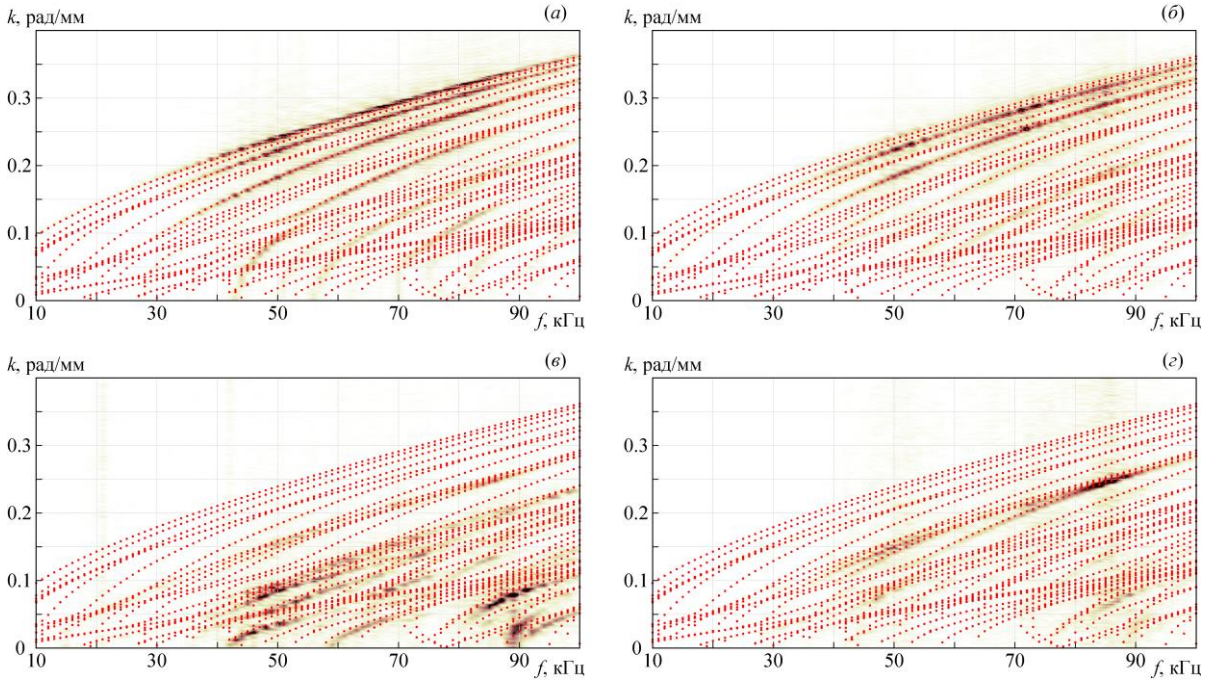


Рис. 3. Сопоставление расчетных и экспериментальных дисперсионных кривых для отрезков Л1 (а), Л2 (б), Л3(в) и Л4(г).

Анализ форм локализации колебаний $\mathbf{U}_n(x, z)$ (рис. 1, *в*) позволяет объяснить отсутствие вклада отдельных мод в $|H(k, f)|$. Так, для мод с $k_n(f) < 0{,}09$ рад/мм компонента $|U_{n,x}|$ близка к нулю. В то же время для трех мод с наибольшими значениями волнового числа узловые точки $|U_{n,x}|$ в шейке расположены таким образом, что для линии сканирования посередине шейки средняя из этих мод не регистрируется. В то же время для отрезка

сканирования близкого к области стыковки шейки и полки, визуализируется только мода с $k_n(f = 50\,\text{кГц}) = 0,222$ рад/мм.

Аналогичные выводы можно сделать и при анализе результатов для отрезков сканирования Л3 и Л4, расположенных на полке балки. Так интенсивная локализация компоненты колебаний $|U_{n,z}|$ посередине полки наблюдается лишь для нескольких мод (рис. 1, *в*). В то же время положение отрезка Л4 относительно узловых точек $|U_{n,z}|$ таково, что в окрестности $f = 50$ кГц существенный вклад в $|H(k, f)|$ дает малое количество мод (например, $k_n = 0,150$ рад/мм, которая при этом не визуализируется для отрезка Л3).

Заключение

Используя метод полуаналитических конечных элементов и экспериментальные измерения на основе сканирующей лазерной виброметрии, на примере двутавровой балки исследованы влияние сложного поперечного сечения волновода на его дисперсионные характеристики. Показано, что возможность регистрации отдельных нормальных мод определяется расположением отрезка сканирования (B-скана) относительно сечения балки и его близостью к узлам пучности соответствующих компонент смещений собственных форм. Полученные результаты могут использоваться для оптимизации экспериментальных методик измерения дисперсионных кривых нормальных мод, необходимых, например, для определения упругих модулей рассматриваемого волновода, а также для оценки геометрических отклонений изготовленного волновода от требований стандарта.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-49-01074, https://rscf.ru/project/25-49-01074/

Список литературы

1. *Cong M., Wu X., Liu R.* Dispersion analysis of guided waves in the finned tube using the semi-analytical finite element method. // J. Sound Vib. 2017. **401**. P. 114.
2. *Loveday P.W., Long C.-S., Ramatlo D.A.* Mode repulsion of ultrasonic guided waves in rails. // Ultrasonics. 2018. **84**. P. 341.
3. *Setshedi I.I., Loveday P.W., Long C.-S., Wilke D.N.* Estimation of rail properties using semi-analytical finite element models and guided wave ultrasound measurements. // Ultrasonics. 2019. **96**. P. 240.
4. *Alleyne D., Cawley P.* A two-dimensional Fourier transform method for the measurement of propagating multimode signals. // J. Acoust. Soc. Am. 1991. **89**, No. 3. P. 1159.

УДК: 539.3 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39683

Компьютерное моделирование динамического поведения системы «пьезоактуатор-слоистый анизотропный волновод»

М.В. Варелджан[1], А.А. Еремин[1,a], Е.В. Глушков[1], Н.В. Глушкова[1]

[1] *Институт математики, механики и информатики, Кубанский государственный университет, 350040 Краснодар, Российская Федерация*

E-mail: [a]eremin_a_87@mail.ru

Аннотация: Рассматривается задача компьютерного моделирования возбуждения бегущих упругих волн в трехмерном слоистом анизотропном волноводе поверхностным пьезопреобразователем. Для ее решения развивается вычислительная схема, сочетающая конечноэлементные расчеты для ограниченного участка волновода, содержащего поверхностную нагрузку и полуаналитический интегральный подход. С использованием предложенной методики строятся и анализируются диаграммы направленности амплитуд колебаний, возбуждаемых пленочным пьезоэлементом в многослойном композитном материале с различными схемами укладки элементарных слоев-препрегов.

Ключевые слова: двухэтапная вычислительная схема, метод конечных элементов, полуаналитический интегральный подход, слоистый анизотропный материал, поверхностный пьезопреобразователь, бегущие упругие волны.

Computer simulation of the dynamic behavior of the "piezoactuator-layered anisotropic waveguide" system

M.V. Vareldzhan[1], A.A. Eremin[1,a], E.V. Glushkov[1], N.V. Glushkova[1]

[1] *Institute for Mathematics, Mechanics and Informatics, Kuban State University, Krasnodar, Russian Federation, 350040*

E-mail: [a]eremin_a_87@mail.ru

Abstract: This paper examines the problem of computer modeling the excitation of elastic guided waves in a three-dimensional layered anisotropic waveguide by a surface-mounted piezoelectric transducer. To solve this problem, a computational framework is developed that combines finite element calculations for a finite-sized subdomain of the considered waveguide containing a surface load and a semi-analytical integral approach. Using the proposed method, directivity patterns of the vibration amplitudes excited by a film piezotransducer in a multilayered composite material with different lay-ups of unidirectional prepregs are evaluated and analyzed.

Keywords: two-stage computational scheme, finite element method, semi-analytical integral approach, layered anisotropic material, surface piezoelectric transducer, elastic guided waves.

PACS: 62.30.+d, 77.84.Cg, 43.20.+g

Введение

Задача компьютерного моделирования динамического взаимодействия ультразвукового пьезоактуатора с многослойной анизотропной подложкой возникает, например, при проектировании и оптимизации систем ультразвуковой диагностики конструкций из слоистых композитных материалов, использующих в качестве физической основы волны Рэлея-Лэмба [1]. Распространенным в инженерной практике подходом к ее решению является использование метода конечных элементов (МКЭ) и его модификаций. Однако его применение для расчета волновой динамики протяженных областей сопряжено с существенными вычислительными затратами [2].

В качестве более эффективной с вычислительной точки зрения альтернативы в настоящей работе рассматривается двухэтапная вычислительная схема [3], сочетающая МКЭ-расчеты для ограниченного участка волновода, содержащего пьезоактуатор, генерирующий упругие колебания, и полуаналитический интегральный подход. Применение такой схемы для моделирования волновой динамики системы «пьезоактуатор-слоистый анизотропный волновод» иллюстрируется результатами расчетов диаграмм направленности амплитуд бегущих упругих волн, возбуждаемых круглым пленочным пьезоэлементом в многослойном композитном материале с однонаправленной и перекрестной схемами укладки слоев-препрегов.

1 Описание компьютерной модели

Рассматривается анизотропный упругий волновод (рис. 1, а), занимающий в декартовой системе координат (x, y, z) объем $W_1 : |x, y| < \infty, -H \le z \le 0$, состоящий из M жестко сцепленных между собой одинаковых слоев-препрегов толщины $h_m = H / M$, $m = 1, ..., M$ с различной ориентацией армирующих волокон. Внешние границы волновода свободны от напряжений за исключением расположенной в плоскости $z = 0$ области Ω, по которой служащий источником колебаний пьезопреобразователь толщины h_p, занимающий объем W_2, контактирует с W_1. Нижняя поверхность пьезонакладки заземлена, а к верхней приложен управляющий электрический сигнал $v(t)$ с частотным спектром $V(\omega)$. Соответствующая разность потенциалов вызывает механические деформации пьезонакладки, что приводит к возникновению контактных напряжений в области Ω, $\boldsymbol{\tau} = \mathbf{q}(x, y)e^{-i\omega t}$,

возбуждающих колебания $\mathbf{u}e^{-i\omega t}$ в упругой подложке; $\mathbf{u}=(u_1,u_2,u_3)=(u_x,u_y,u_z)$ - комплексная амплитуда вектора перемещений, $\boldsymbol{\tau}=(\tau_{xz},\tau_{yz},\sigma_z)$ - вектор напряжений на горизонтальной площадке, $\omega=2\pi f$ - круговая частота, f - частота (далее гармонический множитель $e^{-i\omega t}$ опущен).

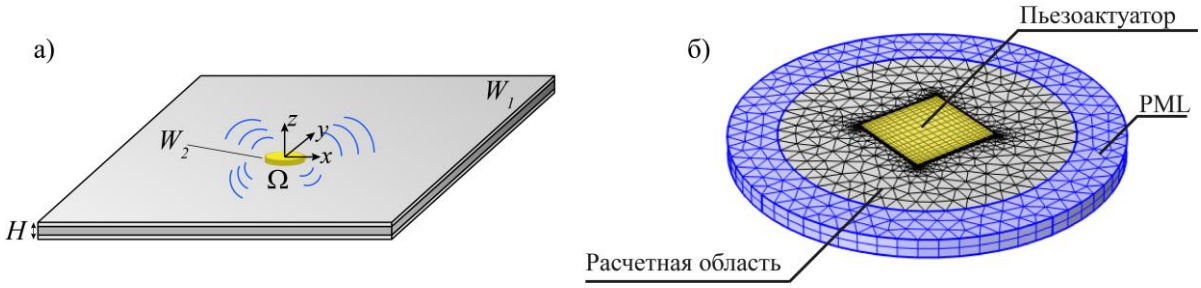


Рис. 1. Геометрия задачи.

С использованием полуаналитического интегрального подхода и техники интегрального преобразования Фурье волновое поле в многослойной анизотропной подложке можно представить в виде [4,5]:

$$\mathbf{u}(\mathbf{x})=\frac{1}{4\pi^2}\int_{\Gamma_1}\int_{\Gamma_2}K(\alpha_1,\alpha_2,z)\mathbf{Q}(\alpha_1,\alpha_2)e^{-i(\alpha_1 x+\alpha_2 y)}d\alpha_1 d\alpha_2\equiv \mathrm{F}^{-1}[K\mathbf{Q}]. \qquad (1)$$

Здесь $K=\mathrm{F}_{xy}[k]$ и $\mathbf{Q}=\mathrm{F}_{xy}[\mathbf{q}]$ - Фурье-символы (результаты применения преобразования Фурье F по горизонтальным координатам x и y) матрицы Грина $k(\mathbf{x})$ рассматриваемого волновода и вектор-функции поверхностной нагрузки $\mathbf{q}(x,y)$ контактных напряжений, возникающих при взаимодействии пьезопреобразователя с упругим волноводом; через α_1 и α_2 обозначены параметры преобразования Фурье, Γ_1 и Γ_2 - контуры интегрирования, проходящие вдоль вещественной оси, отклоняясь в комплексную плоскость α_1 и α_2 соответственно при обходе вещественных полюсов элементов матрицы K в соответствии с принципом предельного поглощения [6].

В дальней зоне квазицилиндрические бегущие волны с волновыми числами s_{nm}, распространяющиеся от источника колебаний $\mathbf{q}(x,y)$, описываются асимптотикой интегралов (1) [5]:

$$\mathbf{u}_n=\sum_{m=1}^{M_n}\mathbf{a}_{nm}(\varphi,z)e^{is_{nm}r}/\sqrt{\zeta r}(1+O(\zeta r)^{-1}),\qquad \zeta r\to\infty. \qquad (2)$$

В ближней к источнику зоне волновое поле $\mathbf{u}$ определяется с помощью численного интегрирования контурных интегралов в представлении (1), используя методы и алгоритмы, описанные в [7]. В обоих случаях, наряду с матрицей K, алгоритм вычисления которой для анизотропных слоистых пластин подробно описан в [5], необходимы неизвестные

контактные напряжения **q**, определяющие вид **Q**. Для определения поверхностной нагрузки **q** используется обобщенная на случай анизотропного волновода двухэтапная вычислительная схема [3]. На первом этапе решается задача о динамическом взаимодействии пьезонакладки и упругого волновода с использованием МКЭ в ограниченной расчетной области, включающей актуатор, с присоединенными к боковым торцам идеально согласованными слоями (PML) для моделирования оттока энергии на бесконечность (рис. 1, б). Из полученного МКЭ-решения на равномерной сетке извлекаются значения вектора смещений $\mathbf{u}^F(\mathbf{x})$ в области $\Omega^F = (\mathbf{x} : (x, y) \in \Omega, z = -H)$, расположенной на противоположной стороне подложки. Такой выбор области Ω^F обеспечивает большую численную устойчивость при реализации схемы [3]. Неизвестная вектор-функция $\mathbf{q}(x, y)$ определяется далее путем численного решения интегрального уравнения:

$$\frac{1}{4\pi^2}\int_{\Gamma_1}\int_{\Gamma_2} K(\alpha_1, \alpha_2, -H)\mathbf{Q}(\alpha_1, \alpha_2)e^{-i(\alpha_1 x+\alpha_2 y)}d\alpha_1 d\alpha_2 = \mathbf{u}_{\mathbf{F}}(x, y, -H), \quad (3)$$

где вектор-функция нагрузки $\mathbf{q}(x, y)$ аппроксимируется набором точечных источников с неизвестными амплитудными коэффициентами $\mathbf{c}_k$:

$$\mathbf{q}(x, y) \approx \mathbf{q}_a(x, y) = \sum_{k=1}^{N_k} \mathbf{c}_k \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_\mathbf{k}). \quad (4)$$

Поиск неизвестных коэффициентов осуществляется методом коллокаций. В этом случае равенство (3) рассматривается на наборе точек $\mathbf{x}_l = (x_l, y_l, -H)$, $l = 1, 2, ..., N_k$, что приводит к системе линейных алгебраических уравнений $A\mathbf{c} = \mathbf{f}$. Элементы матрицы $A = \{a_{lk}\}$, $k, l = 1, 2, ...N$, представляющие собой блоки размера 3×3, определяются по следующей формуле

$$a_{lk} = \frac{1}{4\pi^2}\int_{\Gamma_1}\int_{\Gamma_2} K(\alpha_1, \alpha_2, -H)\Phi_k(\alpha_1, \alpha_2)e^{-i(\alpha_1 x_l+\alpha_2 y_l)}d\alpha_1 d\alpha_2,$$

где $\Phi_k(\alpha_1, \alpha_2)$ - Фурье-символ дельта-функции из разложения (4), а компоненты вектора правой части системы $\mathbf{f} = \{\mathbf{f}_l\}$, $l = 1, 2, ..., N$, берутся из МКЭ-решения: $\mathbf{f}_l = \mathbf{u}^F(\mathbf{x}_l)$.

2 Численные примеры

Для численной проверки корректности компьютерной реализации двухэтапной схемы в случае многослойной анизотропной подложки рассматривался четырехслойный волновод, соответствующий композитному материалу с перекрестной схемой укладки однонаправленных трансверсально-изотропных препрегов $[0^o, 90^o]_s$. Толщина каждого из слоев: $h_i = 0.56$ мм (общая толщина пакета $H = 2.24$ мм), плотность препрега

$\rho = 1522$ кг/м^3; упругие модули: $C_{11} = 119.1$, $C_{22} = C_{33} = 10.6$, $C_{12} = C_{13} = 3.57$, $C_{44} = 2.8$, $C_{55} = C_{66} = 4.45$ (ГПа). В качестве источника колебаний рассматривался пьезокерамический преобразователь из материала PZT-5H толщины $h_p = 0.2$ мм квадратной формы с длиной стороны 5 мм. В приближенном представлении функции нагрузки (4) использовалось $N_k = 225$ точечных сил.

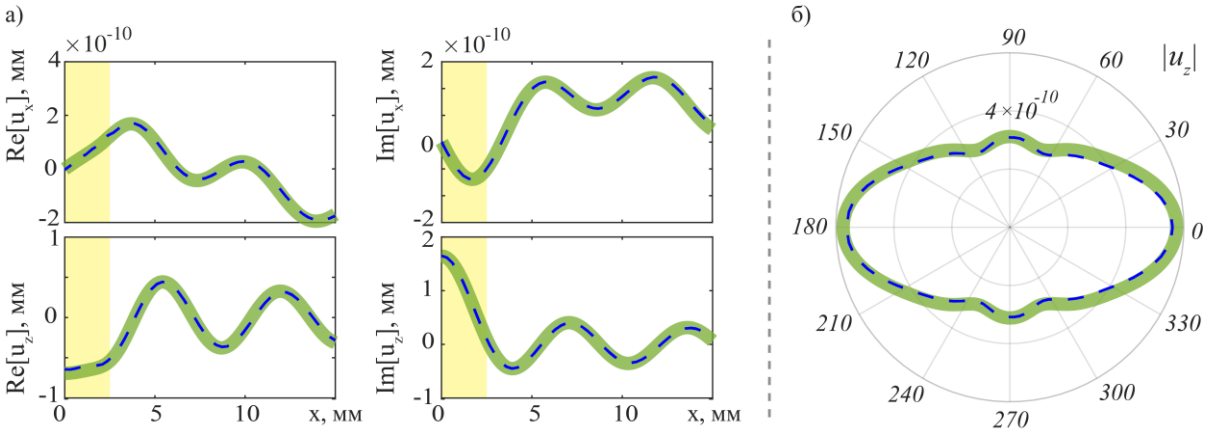


Рис. 2. Тестовое сопоставление результатов предлагаемой двухэтапной схемы (пунктир) с МКЭ Comsol (зеленая линия) для композита с перекрестной схемой армирования на нижней стороне волновода на частоте f = 200 кГц (а). Диаграмма направленности $|u_z(15,\varphi,-H)|$ (б).

Результаты сопоставления расчетов поля смещений на основе двухэтапной схемы и с использованием COMSOL Multiphysics на фиксированной частоте колебаний $f = 200$ кГц вдоль отрезка оси Ox приводятся на рисунке 2 (а). При решении системы линейных алгебраических уравнений, полученных после дискретизации соотношения (3) применялась регуляризация по Тихонову. Желтым цветом обозначена область, из которой извлекались смещения $\mathbf{u}^F(\mathbf{x})$ для определения неизвестных коэффициентов $\mathbf{c}_k$ в соотношении (4). Сопоставление диаграмм направленности $|u_z(r,\varphi,-H)|$ для набора точек, расположенных на окружности радиуса $r = 15$ мм, приводится на рисунке 2 (б). В обоих случаях видна хорошая согласованность получаемых результатов.

Для иллюстрации возможностей использования двухэтапной схемы для расчета амплитудно-частотных характеристик волновых полей в дальней от источника колебаний зоне рассматривались образцы толщины $H = 2.24$ мм, упругие колебаний в которых возбуждались круговым пьезоэлементом диаметра 10 мм и толщины $h_p = 0.2$ мм.

На рисунке 3, (а)-(в) приводятся диаграммы направленности амплитуд радиальной $|u_r(\mathbf{x})|$ и вертикальной $|u_z(\mathbf{x})|$ компонент смещений для соответственно трех частот колебаний f = 100, 200 и 300 кГц для однонаправленного (сплошные линии) и перекрестноармированного (пунктирные линии) образцов. Точки $\mathbf{x}$ в которых с

использованием соотношений (2) рассчитывались указанные величины, располагались на поверхности $z = 0$ вдоль окружности радиуса $r = 30$ мм с центром в начале координат. Представленные результаты наглядно иллюстрируют влияние анизотропии на направленность амплитуд компонент вектора смещений $\mathbf{u}$: в отличие от изотропных материалов, для которых аналогичные графики будут иметь форму окружности, для рассматриваемых композитов поведение $u_r(\mathbf{x})$ и $u_z(\mathbf{x})$ в зависимости от угла φ носит сложный характер, который определяется как главными направлениями симметрии каждого из материалов, так и каустиками, характерными для анизотропных упругих волноводов.

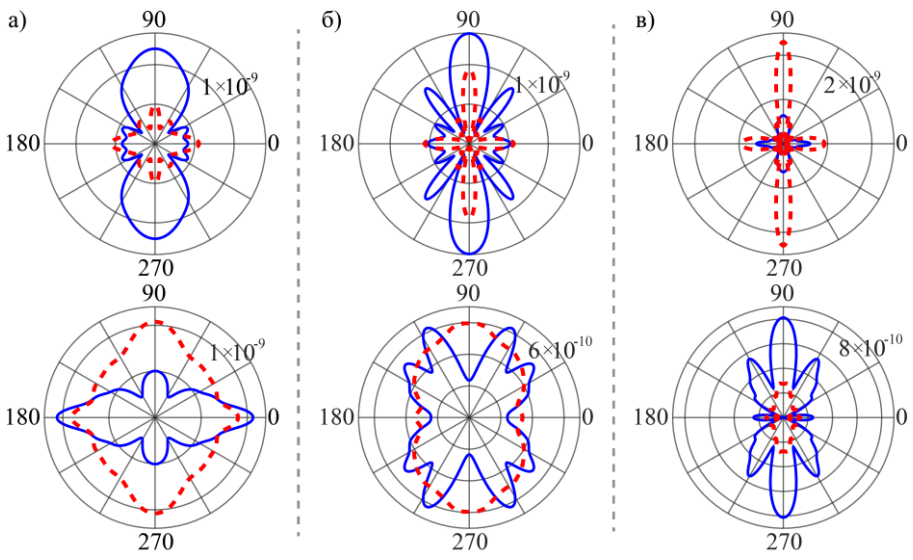


Рис. 3. Диаграммы направленности $|u_r(\mathbf{x})|$ (верхняя строка диаграмм) и $|u_z(\mathbf{x})|$ (нижняя строка диаграмм) в случае круглого актуатора.

Заключение

Используя двухэтапную вычислительную схему, сочетающую полуаналитический интегральный подход и метод конечных элементов, разработана компьютерная модель, описывающая процесс возбуждения фундаментальных и высших мод бегущих упругих волн поверхностными пленочными пьезоэлементами произвольной в плане формы в анизотропной слоистой упругой подложке. На ее основе возможно проведение анализа влияния параметров системы «пьезоактуатор – слоистый анизотропный материал» на амплитудно-частотные и энергетические характеристики возбуждаемых волновых полей. Описываемая в данной работе компьютерная модель может использоваться для оптимизации функционирования аппаратно-программных комплексов ультразвуковой диагностики состояния тонкостенных инженерных конструкций.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России № FZEN-2024-0003.

Список литературы

1. *Giurgiutiu V., Structural Health Monitoring with Piezoelectric Wafer Active Sensors. Second edition*. Elsevier Academic Press, 2024. 1012 p.
2. *Willberg C., Duczek S., Vivar-Perez J. M., Ahmad Z. A. B.* Simulation methods for guided wave-based Structural Health Monitoring: a review // Applied Mechanics Reviews. 2015. Vol 67, No. 010803. P. 1-20. https://doi.org/10.1115/1.4029539
3. *Варелджан М.В.* Двухэтапная вычислительная схема для моделирования возбуждения упругих колебаний в изотропном слое поверхностным пьезопреобразователем // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2024. Т. 21, № 1. С. 57-69. https://doi.org/10.31429/vestnik-21-1-57-69
4. *Ворович И.И., Бабешко В.А.* Динамические смешанные задачи теории упругости для неклассических областей. М.: Наука, 1979. 319 с.
5. *Glushkov E., Glushkova N., Eremin A.* Forced wave propagation and energy distribution in anisotropic laminate composites // Journal of the Acoustical Society of America. 2011. Vol. 129, No. 5. P. 2923-34. https://doi.org/10.1121/1.3559699
6. *Свешников А.Г.* Принцип предельного поглощения для волновода // Докл. АН СССР. 1951. Т. 80, № 3. С. 345-47.
7. *Глушков Е.В., Глушкова Н.В., Варелджан М.В.* Сравнительный анализ эффективности программной реализации полуаналитических методов расчета волновых полей в многослойных анизотропных композитах // Вестник ЮУрГУ. Серия: Математическое моделирование и программирование. 2022. Т. 15, № 5. С. 56-69. https://doi.org/10.14529/mmp220205

УДК: 550.832.46 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39684

Исследование упругих свойств горных пород методом ультразвукового зондирования

М.А. Краснова[a], Д.Е. Белобородов[b]

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (ИФЗ РАН)
123242, г. Москва, Б. Грузинская ул., д. 10, стр. 1. Тел.: 903 6747218; Факс: 499 7662654.

E-mail: [a]mkrasnova@ifz.ru, [b]beloborodov@ifz.ru

Аннотация: Для детального исследования механических свойств и структур горных пород в Институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН разработана методика ультразвукового исследования горных пород (ГП). Образцы ГП подвергаются детальному ультразвуковому сканированию, в результате которого получают многоуровневые индикатрисы скоростей упругих волн, позволяющие определить неоднородности распределения скоростей упругих волн, динамические упругие модули, оценить эффективную анизотропию механических свойств образцов, а также разделить анизотропию и неоднородности в масштабе образца. Пластические деформации в ГП могут существенно изменять внутреннюю структуру ГП, в свою очередь, изменение внутренней структуры может привести к изменению упругих, прочностных, реологических свойств, которое можно контролировать с помощью ультразвукового зондирования.

Точность определения времен пробега и скоростей упругих волн в исследуемой среде определяется характеристиками используемого оборудования и правильностью интерпретации волновых форм. Специальные методические ультразвуковые исследования (УЗИ) на эталонных образцах металлов и сплавов позволили повысить точность определения скоростей в образце до первых десятков м/с. Что касается интерпретации волновых форм, то в связи со сложностью строения исследуемого объекта она может быть существенно затруднена и не всегда поддается контролю.

Ключевые слова: ультразвуковое сканирование горных пород; анизотропия упругих свойств; пьезоэлектрические датчики

Study of elastic properties of rocks by ultrasonic probing

M.A. Krasnova[a], D.E. Beloborodov[b]

Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences. B. Gruzinskaya str., 10, build. 1, 123242, Moscow, Russia

E-mail: [a]mkrasnova@ifz.ru, [b]beloborodov@ifz.ru

Abstract: To study the mechanical properties and structure of rocks in detail, the Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, has developed a method for ultrasonic rock examination. Rock samples are subjected to detailed ultrasonic scanning, resulting in multi-level elastic wave velocity indicatrices. This allows for the determination of elastic wave velocity distribution inhomogeneities and dynamic elastic moduli, the assessment of the effective anisotropy of the samples' mechanical properties, and the separation of anisotropy and inhomogeneities within the sample. Plastic deformations in rocks can significantly alter the internal structure of rocks. This change in internal structure, in turn, can lead to changes in elastic, strength, and rheological properties, which can be monitored using ultrasonic probing.

The accuracy of measuring the travel time and velocities of elastic waves in the studied medium is determined by the characteristics of the equipment used and the correct interpretation of the waveforms. Specialized methodological ultrasound studies (US) on reference metal and alloy samples have significantly improved the accuracy of sample velocity determination, down to a few tens of meters per second. Regarding waveform interpretation, the complexity of the structure of the object being studied can pose significant challenges and is not always controllable.

Keywords: ultrasonic scanning of rocks; anisotropy of elastic properties; ultrasonic transducers

PACS: 43.35.Yb, 43.35.Zc, 43.35.Cg

Введение

Знание состава, внутреннего строения, упругих и прочностных свойств ГП требуется в различных областях человеческой деятельности в строительстве, мониторинге состояния грунтов и нижележащих пород, поиске полезных ископаемых, мониторинге состояния и разработки месторождений, при решении задач геомеханики. Измерения скоростей упругих волн на образцах ГП являются важным источником экспериментальных данных, позволяющих установить связь состава, строения и физических свойств ГП в аналитическом виде при решении этих задач с помощью численного моделирования и теоретических методов. [Дубиня и др., 2022]

Для детального исследования упругих свойств и структуры ГП в институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН разработана методика ультразвукового исследования ГП. По сравнению со стандартными испытаниями по определению упруго-прочностных свойств,

предложенная процедура исследования подготовленных образцов является значительно более детальной. Измерение скоростей распространения продольных и поперечных упругих волн в образце проводится для набора радиальных направлений и вдоль оси образца, строится многоуровневая индикатриса скоростей [Петров, Насимов, 2016]. Проведение таких исследований дает возможность определить наличие в образце разно ориентированных включений, вызывающих неоднородности распределения динамических упругих модулей, а также ориентированных включений, приводящих к анизотропии механических свойств образца, дает возможность разделения анизотропии и неоднородности в масштабе образца [Баюк и др., 2016].

1. Исследование упругих свойств горных пород при нормальных условиях

Для исследования упругих свойств образцов горных пород применялся импульсный динамический метод. Метод основан на измерении времен пробега и скоростей упругих волн, возбуждаемых в исследуемом образце серией повторяющихся импульсов упругих колебаний в ультразвуковом диапазоне частот. Определение скоростей упругих волн производится импульсным динамическим методом на образцах полноразмерных кернов и стандартных цилиндрических образцах диаметром 30 мм, высотой 60 мм. Проводится осевое зондирование образца, когда излучатель и приемник размещаются на противоположных торцах, и радиальные измерения, когда волны возбуждаются в точках, равномерно распределенных на боковой поверхности образца вдоль одного или нескольких профилей, и регистрируются в диаметрально противоположных точках. Такая схема наблюдений позволяет построить пространственное распределение скоростей в виде многоуровневых индикатрис скоростей (рис 1). Определяются скорости продольной и поперечных волн. Динамические модули

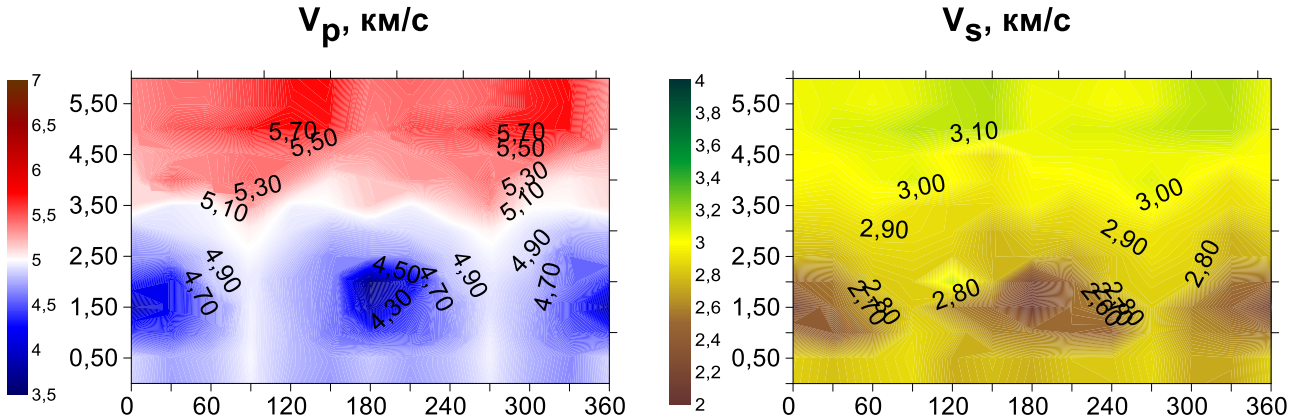


Рис. 1. Разноуровневые индикатрисы скоростей продольной и поперечной волн в образце диаметром 30 мм, высотой 60 мм. Горизонтальная ось – угол поворота трассы измерения относительно начального фиксированного направления. Вертикальная ось – положение трассы измерения относительно основания образца. Значение скорости определяется цветом.

упругости, определяемые по скоростям упругих волн, несколько отличаются от упругих модулей, полученных при статических измерениях. Это расхождение обусловлено

неидеальной упругостью пород, оно минимально для плотных разновидностей и увеличивается по мере снижения плотности ГП. Экспериментально определив модуль Юнга E и коэффициент Пуассона ν, можно вычислить значения модуля сдвига G и модуля всестороннего сжатия K.

2. Оценка точности определения скоростей упругих волн при ультразвуковом сканировании

Одним из важных вопросов в ультразвуковых исследованиях ГП является проблема точности определения времен пробега и скоростей упругих волн в исследуемой среде. Точность определения времен пробега определяется не только характеристиками используемого оборудования, правильностью интерпретации волновых форм, но и параметрами – геометрией и размерами исследуемых образцов ГП. В связи со сложностью строения исследуемого объекта (образца ГП) правильная интерпретация волновых форм часто является трудной задачей. Неверная интерпретация волновых форм приводит к неконтролируемым ошибкам, в то же время как аппаратную точность можно определить и проконтролировать.

Экспериментальная ультразвуковая установка включает пьезоэлектрические датчики, используемые как источник и приемник волн, генератор сигнала, передаваемого на пьезоэлектрический датчик-источник и возбуждающего упругую волну, усилителя принимаемого сигнала и цифрового осциллографа. Для улучшения поверхностного контакта между датчиками и образцом используется специальный гель полисахаридов. Начало регистрации сигнала совпадает с началом сигнала генератора. Вся система имеет конечное время реакции на сигнал генератора, которое необходимо учитывать при обработке. Эту поправку, как правило, определяют по сигналу датчик-датчик, либо по сигналам, прошедшим через эталонный образец с точно известными скоростями и размерами. Однако остается открытым вопрос о точном определении момента вступления сигнала датчик-датчик, а также о точности значений скоростей в эталоне, поскольку опыт показывает, что скорости в реальном эталонном образце алюминия могут отличаться от табличного значения на десятки метров в секунду.

В связи с этим нами было проведено методическое ультразвуковое исследование времен пробега и скоростей упругих волн на эталонных образцах металлов и сплавов. Для работы было изготовлено девять серий цилиндрических образцов из алюминия, стали, титана, бронзы, латуни и меди. Каждая серия включает 7 цилиндров с диаметром 30 мм различной высоты: 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60 мм. Для проверки однородности эталонов проводились радиальное зондирования с шагом 5 мм. Для всех использованных заготовок разброс значений времен

вступлений не превышал 0.02 мкс (одного шага дискретизации), то есть их можно считать однородными.

Исследования проводились разными типами пьезоэлектрических датчиков. В качестве источника и приемника использовались датчики с вариациями комбинаций как одного типа, так и различных типов.

На эталонных образцах определялись времена пробега и скорости продольной волны вдоль оси образца. Анализировались значения скоростей продольных волн, полученных на цилиндрах каждой серии разной высоты. Полученные зависимости скорости от высоты цилиндра позволили уточнить поправки на время реакции системы для всех типов использованных датчиков. Полученные результаты показали, что ошибки определения временной поправки наиболее сильно сказываются на полученных скоростях при работе с образцами высотой менее 15 мм особенно для материалов с высокими скоростями, то есть при работе с образцами горных пород предпочтительно использовать образцы с длиной пробега равными или более 30 мм.

Заключение

Ультразвуковые исследования на образцах ГП являются эффективным методом, позволяющим определять скорости упругих волн в образцах с точностью до первых десятков м/с, осуществлять мониторинг состояния среды в различных лабораторных экспериментах, моделирующих процессы в реальных средах. Полученные распределения скоростей могут быть использованы для построения цифрового керна методами Rock Physics, решении задач геомеханики, оценки напряженного состояния околоскважинного пространства и др.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФЗ РАН.

Список литературы

1. *Дубиня Н.В., Белобородов Д.Е., Краснова М.А., Леонова А.М., Тихоцкий С.А.* Предварительные исследования возможности предсказания изменений внутренней структуры горных пород, вызванных псевдотрехосным сжатием, на основании зависимости деформаций от напряжений // Процессы в геосредах. 2022. № 4(34). С. 1809–1821.
2. *Баюк И.О., Белобородов Д.Е., Березина И.А., Гилязетдинова Д.Р., Корост Д.В., Краснова М.А., Тихоцкий С.А., Хомяк А.Н., Ялаев Т.Р.* Анизотропия или неоднородность? Решение проблемы в масштабе керна // Материалы V Балтийской школы-семинара «Петрофизическое моделирование осадочных пород». 2016. С. 17–20.
3. *Петров В.А., Насимов Р.М.* Способ определения неоднородностей упругих и фильтрационных свойств горных пород. – Патент на изобретение № 2515332 от 13.03.2014 г.

УДК: 534.321.9. DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39685

Физические и технологические задачи ультразвукового склеивания

С.И. Пугачев[1,a], Е.Ю. Рытов[2,b]

[1] *АО «Концерн «МПО-Гидроприбор», Россия, 194044, Санкт-Петербург, Большой Сампсониевский пр., д. 24.*

[2] *Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Россия, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, д. 3.*

E-mail: [a]spugachev@bk.ru, [b]physics_spbmtu@mail.ru

Аннотация: Технические преимущества процесса ультразвукового склеивания (УЗСкл) перед другими способами соединения разнородных материалов привлекают внимание многих исследователей. В то же время сложность процесса УЗСкл, обусловленная необходимостью исследования в большинстве случаев аморфных материалов, изменяющих структуру и свойства при воздействии ультразвуковых колебаний (УЗК), привели к тому, что к настоящему времени не сформулированы положения физического механизма УЗСкл, подтвержденные экспериментом. В связи с этим, а также в связи с наличием большого числа факторов, определяющих техническую эффективность процесса, не разработана принципиальная технология и отсутствуют специализированные ультразвуковые установки для его реализации. В статье предпринята попытка сформулировать основные, по мнению авторов, физические и технологические задачи УЗСк, требующих решения при различных конструктивно-технологических схемах процесса.

Ключевые слова: склеивание, ультразвуковые колебания, физические задачи, технологические задачи, конструктивно-технологические схемы.

Physical and technological problems of ultrasonic gluing

S.I. Pugachev[1a], E.Yu. Rytov[2b]

[1] *JSC «Concern «Sea Underwater Weapons – Gidropribor», Saint Petersburg, 194044, Russia.*

[2] *St. Petersburg state marine technical University, Saint Petersburg, 190121, Russia.*

E-mail: [a]spugachev@bk.ru, [b]physics_spbmtu@mail.ru

Abstract: The technical advantages of the ultrasonic gluing (USGl) process over other methods of joining dissimilar materials attract the attention of many researchers. At the same time, the complexity of the USGl process, due to the need to study in most cases amorphous materials that change their structure and properties when exposed to ultrasonic vibrations (USV), has led to the

fact that the provisions of the physical mechanism of USGl, confirmed by experiment, have not yet been formulated. In this regard, as well as due to the presence of a large number of factors determining the technical efficiency of the process, a fundamental technology has not been developed and there are no specialized ultrasound machines for its implementation. The article attempts to formulate the main, in the opinion of the authors, physical and technological problems of the USGl that require solutions for various design and technological schemes of the process.
Keywords: gluing, ultrasonic vibrations, physical problems, technological problems, design and technological schemes.

PACS: 43.35.Zc

Введение

Ультразвуковое склеивание (УЗСкл) относится к процессам, лежащим в основе соединения разнородных материалов, т. е. материалов, различающихся по химическому составу и молекулярной структуре. Общий подход к образованию подобных соединений разделяют на две стадии [1]. На первой подготовительной стадии соединяемые вещества сближаются на расстояния, требуемые для межатомного взаимодействия и производится подготовка поверхностей к взаимодействию. На второй, конечной стадии, приводящей к образованию прочного соединения, определяющую роль играют квантовые процессы электронного взаимодействия. В связи с этим при формулировке физических и технологических задач УЗСкл целесообразно прогнозировать роль ультразвуковых колебаний (УЗК) на этих стадиях.

1. Физические задачи УЗСкл

Рассмотрим схему процесса, согласно которой УЗК возбуждаются в тонком жидком слое (адгезиве), находящемся на поверхности твердого тела (субстрата) (рисунок 1).

Эта схема, названная нами «схемой тонкого слоя», была положена в основу процесса ультразвуковой металлизации (УЗМ) материалов [2]. Согласно схеме, (рисунок 1), волновое поле возбуждается в объеме жидкости, характерный объем которого меньше или много меньше длины акустической продольной волны в жидкости. Боковая поверхность акустического инструмента возбуждает в вязкой несжимаемой жидкости поле коротковолновых поперечных вязких волн. Их поглощение приводит к возникновению акустических потоков. Кроме того, вдоль контактной поверхности инструмента и жидкости вязкие волны, взаимодействующие с мягкой границей, вызывают среднюю радиационную силу, достаточную для изменения баланса сил на контактной поверхности трех фаз. В зазоре

(тонком слое) между инструментом и поверхностью твердого тела в жидкости возникают знакопеременные давления, величины которых зависят от толщины зазора и числа Рейнольдса. В фазе разрежения эти давления вызывают кавитацию.

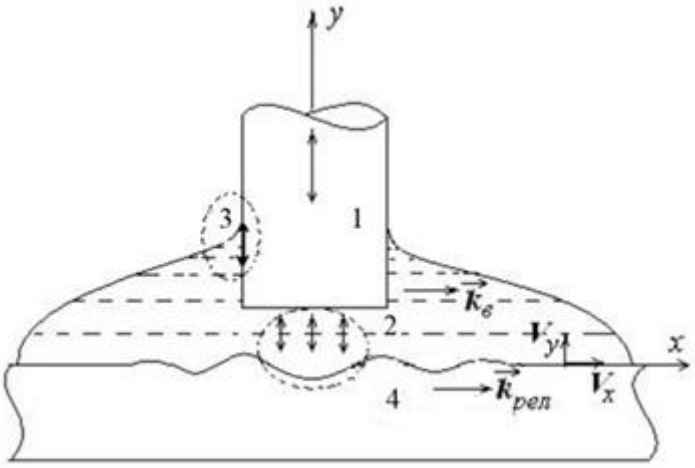


Рис. 1. Расположение акустического инструмента и реагирующих фаз с указанием направлений колебаний их частиц: 1 – инструмент, 2 – объем рабочей жидкости, 3 – область взаимодействия трех фаз, 4 твердая фаза.

Кавитация, течения и радиационная сила, действующие в поле вязких волн на границе раздела трех фаз, обуславливают создание адгезионных соединений в системе жидкость – твердое тело (рисунок 2).



Рис. 2. Акустогидродинамические процессы при УЗМ по схеме тонкого слоя.

Главную роль в процессе УЗСкл большинство исследователей отводит кавитации, не указывая, какую из физических моделей кавитации – тепловую или электрическую – [3-5]

они используют и не учитывая особенности возникновения и протекания кавитации в выбранной жидкости и в используемой конструктивно-технологической схеме.

Нами в анализе кавитации в УЗМ по схеме тонкого слоя была использована тепловая модель кавитации с учетом того, что кавитационный пузырек захлопывается в расплаве металла вблизи твердой стенки с образованием кумулятивной струи, ударяющей в стенку [6].

Главной особенностью процесса УЗСкл, например, по сравнению с процессом УЗМ, является использование в качестве жидких адгезивов расплавов полимеров – неньютоновских жидкостей высокой вязкости. Поэтому актуальной физической задачей исследования УЗСкл служит создание физической модели кавитации, учитывающей особенности молекулярной структуры и химической связи этих материалов.

Эксперименты показывают, что в отсутствии кавитации главная роль в процессе УЗСкл принадлежат акустическим течениям. Поэтому физический анализ особенностей возникновения и распространения акустических течений в расплавах полимеров является актуальной физической задачей.

2. Технологические задачи УЗСкл

Разработке технологических режимов УЗСкл должно предшествовать обоснование наличия кавитации в жидкости, а также измерение акустической мощности, возбуждаемой в жидкости, в том числе в режиме развитой кавитации [7].

К другим технологическим задачам относится выбор конструктивно-технологической схемы УЗСкл и определение технических режимов реализации процесса. Типичный технологический режим включает определение амплитуды УЗК, зазора между погруженным в жидкость наконечником акустического инструмента и поверхностью твердого тела, скорости процесса нанесения жидкого адгезива на поверхность твердого тела, угла наклона акустического инструмента к этой поверхности.

Применительно к конкретным адгезивам, по разработанным технологическим режимам исследуется воздействие УЗК на реологические характеристики адгезива (вязкость, поверхностное натяжение, смачивание), на газосодержание, на продолжительность отверждения адгезива, на процессы химического взаимодействия адгезива и субстрата [8-10].

Во введении отмечено, что УЗСкл следует рассматривать как один из способов соединения разнородных материалов. С этой точки зрения реализация представленных выше физических и технологических задач позволяет применить для рассмотрения физико-химической природы УЗСкл современные теории соединения разнородных материалов – теории адгезии.

С общих позиций различают [11]: 1) адгезию на молекулярном уровне (молекулярные взаимодействия) и 2) адгезию на макроскопическом уровне.

В первом случае взаимодействие фаз в системе субстрат – адгезив исследуется в рамках адсорбционной, химической, электрической и диффузионной теорий. Последняя считается наиболее применимой для рассмотрения адгезии полимеров к твердым телам. Задачей исследователей является, исходя из основных положений этой теории, оценить активирующее действие УЗК на процессы формирования адгезионных соединений при УЗСкл.

При рассмотрении адгезии на макроскопическом уровне основную роль играют реологические характеристики: смачивание, поверхностное натяжение, вязкость, поверхностная энергия. При этом активирующее действие УЗК на смачивание расплавами полимеров поверхности твердого тела и на вязкость расплавов полимеров подтверждено экспериментами.

Можно предположить, что при УЗСкл в объеме адгезива реализуются взаимодействия на микроскопическом уровне, а на границе раздела жидкость – твердое тело – на макроскопическом уровне. В обоих случаях роль УЗК сводится к активации процессов взаимодействия и, в результате, к повышению эксплуатационных характеристик образующихся соединений разнородных материалов.

Заключение

Для разработки физических и технологических задач процесса УЗСкл в статье использованы результаты проведенных авторами исследований процесса ультразвуковой металлизации (УЗМ) материалов, который протекает по аналогичной УЗСкл схеме тонкого слоя.

Решение этих задач позволит сформулировать основные положения физического механизма воздействия ультразвука на систему полимерный расплав – твердое тело и расширить технологические возможности ультразвукового склеивания как эффективного способа создания высокопрочных соединений разнородных материалов.

Список литературы

1. *Рыкалин Н.Н., Шоршоров М.Х., Красулин Ю.Л.* Физические и химические проблемы соединения разнородных материалов. // Известия АН СССР. Неорганические материалы. 1965. № 1. С. 29-37.

2. *Красавина М.А., Пугачев С.И., Семенова Н.Г.* Ультразвуковая металлизация электрофизической керамики. СПб.: Изд. Политехнич. ун-та, 2013.

3. *Lauterborn W., Kurz T.* Physics of bubble oscillations. // Reports on Progress in Physics. 2010. V. 73, 106501.

4. *Борисенок В.А.* Сонолюминесценция: эксперименты и модели (обзор). // Акустический журнал, 2015. Т. 61, № 3. С. 333-360.

5. *Маргулис М.А., Половинкин В.Н., Яшин А.И.* Современные подходы к описанию динамики кавитационных пузырьков и кавитационного облака. // Морские интеллектуальные технологии, 2023. № 2. Часть 1. С. 320-326.

6. *Красавина М.А., Кувшинов Г.И., Пугачев С.И., Семенова Н.Г.* К выбору зазора инструмент-образец при ультразвуковой металлизации. // ФХОМ, 1996, Вып. 4. С. 100-107.

7. *Маргулис М.А., Конопацкая И.И., Маргулис И.М.* Измерение излученной и поглощенной акустической мощности сравнительным калориметрическим методом // Ежегодник РАО, 2006. Вып. 7. Акустика неоднородных сред. С. 1-17.

8. *Avila-Orta C., Espinoza-Gonzalez C., Martines-Colunga G., Bueno-Baques D., Maffezzoli A., Lionetto F.* An overview of progress and current challenges in ultrasonic treatment of polymer melts. // Advances in Polymer Technology, 2013. V. 32, No. S1, E582-E602.

9. *Zhou Z., Chen C.* Research advances in the ultrasonic-assisting adhesive bonding. // Journal of Manufacturing Processes 110 (2024). P. 134-160.

10. *Краснов А.В., Пугачев С.И., Павловский А.С., Семенова Н.Г.* Ультразвуковое смачивание жидкостью твердого тела и его применение в гидроакустике. // ГА-2016. СПб. 2016. С. 424-426.

11. *Bricotte L., Chougrani K., Alard V., Ladmiral V., Caillol S.* Adhesion theories: A didactic review about a century of progress. // International Journal of Adhesion and Adhesives 132 (2024). 103673.

УДК: 534-8 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39686

Ультразвуковая интенсификация массообмена в газожидкостных системах

А.Р. Барсуков[a], Р.Н. Голых[b], В.Н. Хмелев[c], И.А. Маняхин[d]

Бийский технологический институт (филиала) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова». 659305, Алтайский край, г. Бийск, ул. Героя Советского Союза Трофимова, д. 27.

E-mail: [a]barsukov.ar@bti.secna.ru, [b]grn@bti.secna.ru, [c]vnh@bti.secna.ru, [d]maniakhin.ia@bti.secna.ru

Аннотация: Основная проблема ускорения поглощения газа жидкостью за счет классического кавитационного воздействия при стандартных условиях (температура не более 20 ºС) обусловлена невозможностью формирования поверхностных волн на внутренней поверхности газового пузырька для увеличения межфазной поверхности взаимодействия при увеличении вязкости жидкости более 12 мПа·с, когда гидродинамические свойства жидкости мало отличаются от воды и спирта. Это объясняется быстрым затуханием волн за счёт сил вязкого трения. Однако, во многих случаях (например, при поглощении попутных нефтяных газов для предотвращения коррозии трубопровода, получении медицинских растворов, насыщаемых химически активными газами для лечебного воздействия или озонирование для обеззараживания, реализации химических технологий производства энергонасыщенных материалов) требуется реализация процесса поглощения газов жидкостями, которые при нормальных температурных условиях (20 ºС) имеют высокую вязкость (до 30 мПа·с).

Для решения проблемы авторами работы выявлены условия, при которых УЗ воздействие обеспечивает снижение вязкости жидкости, и одновременно обеспечивает достаточную интенсивность кавитации для формирования поверхностных волн на внутренней поверхности газового пузырька и увеличение межфазной поверхности взаимодействия. Выявленные условия позволили предложить и реализовать новую технологию повышения эффективности поглощения газов в вязких жидкостях за счет единовременной оптимизации режимов ультразвукового кавитационного воздействия и температурных условий. Практическая реализация новой технологии обеспечивает увеличение поглощения газов вязкими жидкостями на 30…80 %.

Ключевые слова: ультразвук, моделирование, абсорбция, кавитация, жидкость, газ.

Abstract: The main problem of accelerating the absorption of gas by a liquid due to the classical cavitation effect under standard conditions (temperature no more than 20 ° C) is due to the

impossibility of forming surface waves on the inner surface of the gas bubble to increase the interfacial interaction surface with an increase in the viscosity of the liquid of more than 12 MPa • s, when the hydrodynamic properties of the liquid differ little from water and alcohol. This is due to the rapid attenuation of waves due to viscous friction forces. However, in many cases (for example, when absorbing associated petroleum gases to prevent pipeline corrosion, obtaining medical solutions saturated with chemically active gases for therapeutic effects or ozonation for disinfection, implementing chemical technologies for the production of energy-saturated materials) It requires the implementation of the process of absorption of gases by liquids that, under normal temperature conditions (20 ° C), have a high viscosity (up to 30 MPa•s).

To solve the problem, the authors identified the conditions under which ultrasonic action reduces the viscosity of the liquid, and at the same time provides sufficient cavitation intensity for the formation of surface waves on the inner surface of the gas bubble and an increase in the interfacial interaction surface. The identified conditions made it possible to propose and implement a new technology to increase the efficiency of gas absorption in viscous liquids by simultaneously optimizing the modes of ultrasonic cavitation and temperature conditions. The practical implementation of the new technology provides an increase in the absorption of gases by viscous liquids by 30...80%.

Index terms: ultrasound, modeling, absorption, cavitation, liquid, gas.

Введение

Процессы растворения газов в жидкостях протекают гораздо медленнее, чем в так называемых системах «газ-газ» или «жидкость-жидкость». Данная особенность обусловлена тем, что коэффициенты диффузии газов в жидкостях в 5 000-10 000 раз ниже, чем у газов в газах [1, 2].

Особую практическую значимость представляет поглощение газов вязкими жидкостями в задачах нефтедобычи (когда требуется поглощение попутных нефтяных газов для предотвращения коррозии трубопровода), получения медицинских растворов (когда требуется поглощение химических активных газов для лечебного воздействия или озонирование для обеззараживания), химических технологий производства энергонасыщенных материалов. При этом поглощение газов вязкими жидкостями проходит гораздо медленнее, чем невязкими.

Для преодоления этого ограничения необходимо увеличение контактирующей поверхности взаимодействия между газовой и жидкой фазами для увеличения общей скорости массопереноса, которую возможно увеличить за счёт волнообразных возмущений. Поэтому, одним из наиболее эффективных способов увеличения поверхности

взаимодействия между газовой и жидкой фазами является генерация на поверхности растворяемого пузырька периодических волн давления с помощью ультразвуковой кавитации.

Ранее авторами теоретически и экспериментально установлено [3, 4], что при стандартных условиях (температура 20 ºС, давление 1…4 атм) предельная вязкость жидкости, при которой достигается эффект, не превышает 12 мПа·с. Однако, в выше перечисленных практически важных процессах вязкость поглощающих жидкостей может быть значительно выше и достигать 30 мПа·с при этих же условиях.

Поэтому необходим поиск новых физических возможностей реализации поглощения газов вязкими жидкостями. Один из возможных подходов – ультразвуковое кавитационное воздействие с одновременным повышением температуры.

Однако, при повышении температуры жидкости на эффективность поглощения газа влияют 2 взаимоисключающих фактора:

1. Возможность многократного увеличения их амплитуды поверхностных волн за счет уменьшения декремента затухания колебаний при снижении вязкости.
2. Уменьшение величины возмущающих сил, которые инициируют поверхностные волны за счет снижения интенсивности кавитации.

В связи с этим, возникает необходимость теоретических и экспериментальных исследований кавитационного процесса на границе раздела, обеспечивающего формирование капиллярных волн с учётом изменения вязкости жидкости при повышенной температуре и с учётом фазовых переходов.

Результаты исследований представлены в следующем разделе.

1 Основная часть

При проведении теоретических исследований за основу взята модель формирования капиллярных волн, описанная в ранее опубликованной работе [5]. Поскольку, как было отмечено ранее, необходимо учитывать влияние фазовых переходов при повышенной температуре, была произведена [5] модификация модели развития кавитационного пузырька.

За основу построения уравнений динамики пузырька с учётом фазовых переходов и теплопроводности взята работа авторов Института механики и машиностроения КазНЦ РАН [5], в которой предлагается наиболее полная, на сегодняшний день, численная модель динамики газового пузырька, одновременно учитывающая следующие факторы:

1. Деформацию пузырька при сжатии.
2. Теплообмен газа внутри пузырька с окружающей жидкостью.
3. Фазовые переходы «жидкость-пар» и обратно.
4. Сжимаемость жидкости.

Однако, представленная модель отличается высокой сложностью алгоритма расчёта, по сравнению с решением обыкновенных дифференциальных уравнений. Кроме того, модель не учитывает вязкости среды.

Поэтому авторами был осуществлён вывод модифицированного уравнения (без учёта деформации пузырька, не требуемой для разработки модели, но с учётом изменения вязкости жидкости) и, в результате интегрирования уравнения сохранения импульса жидкости в дифференциальной форме, получено следующее уравнение динамики газового пузырька с учётом фазовых переходов и вязкости:

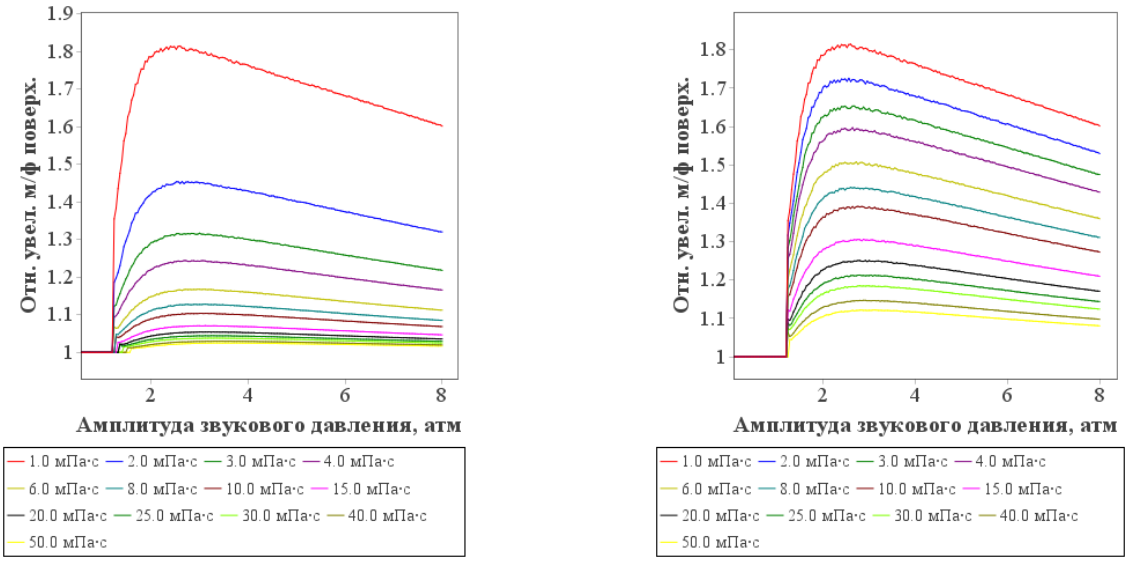
$$2\left(\frac{dR}{dt}\right)^2 + R\frac{d^2R}{dt^2} - 2\left(\frac{dR_0}{dt}\right)^2 - 2\frac{dR}{dt}\frac{J}{\rho} + R\frac{1}{\rho}\frac{dJ}{dt} = R\frac{d^2R_0}{dt^2};$$

$$\rho\left(\frac{3}{2}\left(\frac{dR}{dt}\right)^2 + R\frac{d^2R}{dt^2} + \frac{1}{2}\left(\left(\frac{dR}{dt}\right)^2 - \left(\frac{dR}{dt} + \frac{J}{\rho}\right)^2\right) + R\frac{1}{\rho}\frac{dJ}{dt}\right) = p_g - 4\eta\frac{\frac{dR}{dt} - \frac{J}{\rho}}{R} - \frac{2\sigma}{R} - p_\infty;$$

где η – вязкость жидкости, Па·с; σ – поверхностное натяжение жидкости; p_g – давление газа внутри пузырька, Па; p_∞ – давление на больших расстояниях от пузырька, обусловленное акустическими колебаниями, Па; R_0 – радиус выделенной сферической плоскости, которая движется вместе с жидкостью, и не участвует в фазовом переходе, м; R – фактический радиус кавитационного пузырька, м; J – удельный поток массы жидкости, переходящей в жидкой в паровую фазу, кг/(м^2·с^2); ρ – плотность жидкости, кг/м^3; K – коэффициент пропорциональности определяющий скорость испарения жидкость в зависимости от разности давления насыщенного пара и парциального давления пара, кг/(Па·м^2·с^2); P_{sat} – давление насыщенного пара при текущей температуре, Па; P_v – парциальное давление пара в жидкости, Па.

Полученное уравнение динамики газового пузырька позволяет устанавливать зависимости амплитуды давления ударной волны от свойств жидкости и параметров ультразвукового воздействия и определять площадь межфазной поверхности с помощью модели формирования капиллярных волн, приведённой в работе [3].

На рисунке 1 приведены зависимости достигаемого относительного увеличения площади межфазной поверхности от амплитуды звукового давления (частота колебаний здесь и далее, в том числе в экспериментальных исследованиях, составляет 22 кГц). Зависимости получены на примере водно-глицеринового раствора при различных температурах и различных исходных вязкостях жидкости при температуре 20 ºС.



а) 20ºС б) 60ºС

Рис. 1. Зависимости относительного увеличения межфазной поверхности от амплитуды звукового давления вблизи межфазной поверхности при различных исходных вязкостях жидкости и температурах (здесь и далее частота колебаний – 22 кГц)

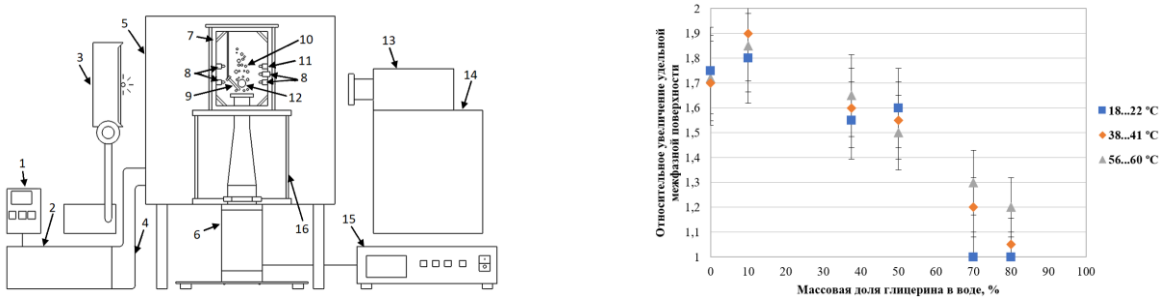
Согласно полученным результатам, при температуре 20ºС (рис. 1а) для жидкостей, имеющих исходную вязкость 8 мПа·с, межфазная поверхность возрастает под действием ультразвуковой кавитации на 30% (в 1,3 раза) и более. А для жидкостей с вязкостью воды 1 мПа·с межфазная поверхность увеличивается на 80%. В свою очередь, для жидкостей с вязкостью от 10…15 мПа·с и выше достигаемое увеличение межфазной поверхности не превышает 1,1 (не более чем на 10%). Данные на рис. 1а согласуются с ранее полученными результатами.

Если повысить температуру, при которой осуществляется воздействие, до 60ºС, то, как уже говорилось, одновременно снижаются вязкость и интенсивность кавитации. Однако превалирующим фактором, влияющим на увеличение межфазной поверхности, является уменьшение декремента затухания. При этом, интенсивность кавитации при данной температуре обеспечивает формирование развитой межфазной поверхности.

Так, например, для жидкостей с исходной вязкостью (при температуре 20ºС) 10…15 мПа·с происходит увеличение межфазной поверхности при температуре 60 ºС не менее, чем в 1,3 раза. При этом, для жидкостей с исходной вязкостью до 50 мПа·с увеличение межфазной поверхности превышает 1,1 раз, а для жидкостей с вязкостью 20 мПа·с увеличение межфазной поверхности превышает 1,25 раз (при температуре 20 ºС для таких жидкостей увеличение межфазной поверхности было практически незаметным и не превышало 1,05 раз).

Для экспериментального подтверждения теоретически установленного факта возрастания эффекта ультразвукового кавитационного воздействия для вязких жидкостей с

повышением температуры был ранее разработан специализированный лабораторный стенд, конструктивная схема которого приведена на рисунке 2а [4]. Стенд позволил получить серии изображений межфазной поверхности. Авторами проведён анализ изображений, позволивший определить зависимости увеличения межфазной поверхности от температуры и исходной вязкости жидкости (при стандартной температуре). Зависимости приведены на рисунке 2б.



а) б)

Рис. 2. Схема лабораторного стенда для исследования влияния температурных режимов и ультразвуковых колебаний на формирование межфазной поверхности (а) и результаты экспериментов (б): 1 – TRM-10, 2 – теплопушка, 3 – прожектор, 4 – воздуховод, 5 – термокамера, 6 – УЗКС, 7 – держатель, 8 – измерительные термопары, 9 – инжекционный канал, 10 – кавитационный канал, 11 – термапара (TRM-10), 12 – барботажный пузырь, 13 – высокоскоростная камера, 14 – подставка для камеры, 15 – электронный генератор, 16 –технологический объём

Результаты обработки экспериментальных данных качественно согласуются с полученными теоретическими зависимостями и позволили установить следующее:

–при температуре 18…22 °С и исходных вязкостях водно-глицеринового раствора 25,1 и 41,2 мПа·с эффект практически не наблюдается (для вязкостей 12,5 мПа·с и менее межфазная поверхность увеличивается более, чем в 1,5 раза – результат, который превосходит теоретический);

– повышение температуры до 38…41 °С приводит к заметному эффекту (даже с учётом погрешности) воздействия ультразвуковой кавитации даже на жидкость с исходной вязкостью 25,1 мПа·с;

– УЗ воздействие при температуре 56…60 °С обеспечивает увеличение поверхности раздела газа и жидкости с исходной вязкостью 41,2 мПа·с до 1,2 раз, а жидкости с исходной вязкостью 25,1 мПа·с – до 1,3 раз. Такого эффекта не наблюдалось при комнатной температуре. В свою очередь, повышение температуры усиливает эффект ультразвуковой кавитации даже для маловязких жидкостей. Для жидкости с исходной вязкостью 1,5 мПа·с межфазная поверхность увеличивается до 1,9 раз при температуре 56…60 ºС (при температуре 18…22 ºС достигнутое увеличение составляло 1,8 раз).

При температуре 70 °С и выше роста эффекта кавитационного воздействия не наблюдается.

Полученные результаты позволили предложить новую технологию эффективной ультразвуковой интенсификации процесса поглощения газов вязкими жидкостями.

Заключение

Предложена и экспериментально подтверждена возможность реализации новой технологии ультразвуковой интенсификации поглощения газов вязкими жидкостями.

В основу предложенной технологии положена оптимизация температурных условий, способных обеспечить формирование волн в вязких жидкостях на поверхности газового пузырька.

Теоретически и экспериментально установлено, что повышение температуры с 20 до 60 градусов Цельсия обеспечивает достижение развитой межфазной поверхности (увеличение достигает 30 % и более) жидкостей с вязкостью 25…40 мПа·с, для которых такой эффект не реализуется при температуре 20 ºС.

Предложенный и научно обоснованный подход позволяет создать технологии эффективной ультразвуковой интенсификации поглощения газов жидкостями в задачах нефтедобычи (когда требуется поглощение попутных нефтяных газов для предотвращения коррозии трубопровода), получения медицинских растворов (когда требуется поглощение химических активных газов для лечебного воздействия или озонирование для обеззараживания) и химических технологий производства энергонасыщенных материалов.

Исследование выполнено при поддержке РНФ №23-12-00278.

Список литературы

1. *Новосёлов А.Г., Дужий А.Б., Голикова Е.Ю.* Молекулярная диффузия газов в жидкости. Коэффициенты молекулярной диффузии диоксида углерода в воде // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия "Процессы и аппараты пищевых производств". - 2014. - № 2.

2. *Подрыга В.О., Вихров Е.В., Поляков С.В.* Молекулярно-динамический расчет коэффициента диффузии газов на примере аргона, азота, водорода, кислорода, метана и углекислого газа // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. - 2019. - № 96. 10.20948/prepr-2019-96.

3. *Golykh R.N.* Generalized functions of slow growth problem statement for capillary wave formation in gas-liquid interface under ultrasonic cavitation // Mathematical Notes of NEFU. - 2025. - No. 2.

4. *Golykh R.N., Carrat J.B., Manyakhin I.A., Barsukov A.R.* Influence of liquid viscosity on growth of the surface of an air bubble subjected to ultrasonic cavitation // Physics of Fluids. - 2025. - V. 37, Iss. 12. - P. 122106. 10.1063/5.0300785.

5. *Аганин А.А., Халитова Т.Ф., Хисматуллина Н.А.*. Метод численного решения задач сильного сжатия несферического кавитационного пузырька // Вычислительные технологии. Т. 15, №1, 2010.

УДК: 534.8. DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39687

Сравнительный численный анализ сферических ультразвуковых излучателей из пористой и сплошной пьезокерамик

А.С. Леднов[a], А.В. Наседкин[b], И.А. Швецов[c], А.Н. Рыбянец[d]

Южный федеральный университет. 344006 г. Ростов-на-Дону, ул. Б. Садовая, 105/42.

E-mail: [a]alednov@sfedu.ru, [b]avnasedkin@sfedu.ru, [c]mipa@sfedu.ru, [d]anrybyanets@sfedu.ru

Аннотация: Проведено численное и экспериментальное исследование фокусирующих сферических пьезоизлучателей медицинского ультразвука, разрабатываемых в НИИ физики ЮФУ. Эти преобразователи имеют электродированные сферические поверхности и выполнены из пористой пьезокерамики, поляризованной по радиусу. При работе на первых электрически активных частотах толщинных колебаний преобразователи генерируют акустические волны, излучаемые во внешнюю среду, моделирующую мягкие биологические ткани. За счет интерференции в фокальной зоне наблюдаются большие амплитуды волн давления, что важно для различных медицинских применений. Основная особенность состояла в использовании пористой пьезокерамики, которая имеет меньший акустический импеданс по сравнению с плотной, а следовательно, и лучшее согласование с импедансом внешней среды. Было проведено конечно-элементное моделирование сферических пьезоизлучателей, в том числе нагруженных на вязкие акустические среды, и исследована их эффективность. При этом эффективные модули пористой пьезокерамики рассчитывались из решения задач гомогенизации с использованием упрощенных моделей неоднородной поляризации. Для частных случаев осуществлена валидация результатов численных расчетов с данными натурных экспериментов. Проведено также сравнение излучателей из пористой пьезокерамики с излучателями из плотной керамики с двумя переходными упругими слоями, на основе которого сделан вывод об эффективности использования пористой пьезокерамики.

Ключевые слова: сферический излучатель, фокальная зона, волна давления, пористая пьезокерамика, компьютерное моделирование.

Comparative numerical analysis of spherical ultrasonic transducers from porous and solid piezoceramics

A.S. Lednov[a], A.V. Nasedkin[b], I.A. Shvetsov[c], A.N. Rybyanets[d]

Southern Federal University, 105/42 Bolshaya Sadovaya Str., Rostov-on-Don 344006, Russia.

E-mail: [a]avnasedkin@sfedu.ru , [b]aanasedkina@sfedu.ru, [c]mipa@sfedu.ru, [d]anrybyanets@sfedu.ru

Abstract: A numerical and experimental study was conducted on focusing spherical piezoelectric transducers for medical ultrasound, developed at the Research Institute of Physics of the Southern Federal University. These transducers have electrode-coated spherical surfaces and are made of porous piezoelectric ceramics polarized along their radius. When operating at the first electrically active frequencies of thickness vibrations, the transducers generate acoustic waves emitted into an external medium simulating soft biological tissue. Due to interference in the focal zone, large pressure wave amplitudes are observed, which is important for various medical applications. The key feature was the use of porous piezoelectric ceramics, which have a lower acoustic impedance than dense ceramics, and therefore better match the impedance of the external medium. Finite element modeling of spherical piezoelectric transducers, including those loaded on viscous acoustic media, was carried out, and their efficiency was investigated. The effective moduli of porous piezoceramics were calculated by solving homogenization problems using simplified models of inhomogeneous polarization. For specific cases, the numerical calculation results were validated against field experimental data. A comparison of porous piezoceramic transducers with dense ceramic transducers with two elastic matched layers was also conducted, leading to a conclusion regarding the effectiveness of using porous piezoceramics.

Keywords: spherical transducer, focal zone, pressure wave, porous piezoceramics, computer modeling

PACS: 43.35.Zc

Введение

Системы фокусированного ультразвука нашли широкое применение в различных биомедицинских приложениях [1]. В этих системах в качестве активных элементов достаточно часто используются пьезоэлектрические материалы. Пористая пьезокерамика представляется перспективным материалом для генерирования высокоинтенсивного фокусированного ультразвука, поскольку она имеет меньший акустический импеданс по сравнению с плотной пьезокерамикой, и поэтому для нее можно обойтись без согласующих переходных слоев [2], что облегчает конструкцию преобразователя. Так, в [3-5] и в других работах, были исследованы пьезоизлучатели в форме сферических сегментов с технологическим отверстием по середине, выполненные из пористой пьезокерамики. В настоящем исследовании проводится сравнение пьезоизлучателей из сплошной и пористой сегнетожестких пьезокерамик ПКР-8* на основе численных расчетов в конечно-элементном (КЭ) пакете ANSYS APDL.

1 Постановка задачи

Рассмотрим сферический пьезоизлучатель, погруженный в акустическую жидкость. На рис. 1 (*a*) показано меридиональное сечение пьезоизлучателя в цилиндрической системы координат $Or\varphi\ z$. Область, закрашенную бирюзовым цветом, занимает пьезоизлучатель, который имеет толщину h, внутренний радиус R и максимальную внутреннюю полуширину d. Пьезоизлучатель выполнен из пьезокерамики, поляризованной вдоль радиального направления в соответствующей сферической системе координат, связанной с фокальной точкой O_f. Торцевые поверхности $r=R$ и $r=R+h$ электродированы. Акустическая среда заполняет области, закрашенные серым цветом. Геометрические размеры для пьезоизлучателя задавались следующими: R=60 (мм), d=50 (мм), а толщина h подбиралась так, чтобы первая электрически активная частота его толщинных колебаний была приблизительно равной f_{a1}=250 (кГц). Размеры акустической области были выбраны так, чтобы в ней целиком помещалась фокальная зона, а задаваемые импедансные условия на внешней границе акустической области не давали отраженных волн, существенных для фокальной зоны. В данных материалах для пьезоизлучателя рассматривались три набора констант сегнетожесткой пьезокерамики ПКР-8*: сплошная пьезокерамика (вариант 1) и пористая пьезокерамика с 20 % пористости с двумя наборами эффективными модулями, найденными по методологии, близкой к описанной в [7]. В варианте 2 при решении задач гомогенизации предполагалась однородная поляризации пьезокерамической матрицы, а в варианте 3 – неоднородная модель поляризации (модель 5 из [7]). Значения этих модулей в стандартных для теории пьезоэлектричества обозначениях представлены в таблице 1.

Таблица 1. Материальные свойства пьезокерамики ПКР-8*: 1 – плотная, 2, 3 – пористая.

Вид пьезокерамики	ρ, 10^3 кг/м^3	$c^E_{\alpha\beta}$, 10^{10} Н/м^2					$e_{j\beta}$, Кл/м^2			$\tilde{\varepsilon}^S_{jj}=\varepsilon^S_{jj}/\varepsilon_0$	
		c^E_{11}	c^E_{12}	c^E_{13}	c^E_{33}	c^E_{44}	e_{33}	e_{31}	e_{15}	$\tilde{\varepsilon}^S_{11}$	$\tilde{\varepsilon}^S_{33}$
1) Сплошная	7.8	11.2	5.7	5.1	9.9	2.5	15.2	-6.9	11.6	730	690
2) p=20 %, H	6.24	7.62	3.65	3.17	6.61	1.78	11.57	-3.72	7.97	581.61	540.48
3) p=20 %, IH	6.24	7.54	3.52	3.13	6.64	1.81	11.37	-3.04	7.41	609.44	563.18

С использованием данных из таблицы 1 для толщины пьезоизучателя были получены значения h=8.4 (мм) для варианта 1, h=7.8 (мм) для варианта 2, и h=7.7 (мм) для варианта 3.

Для акустической среды принимались следующие значения материальных параметров: плотность ρ= 835 (кг/м^3), скорость звука c=1.42·10^3 (м/с), динамическая вязкость μ= 3 (Па·с).

В пьезокерамике задавалось также частотно-независимое демпфирование через добротность Q_d=800 для сплошной керамики и Q_d=640 – для пористой. Пьезоизлучатель считался жестко защемленным в крайней правой точке при $r=R+h$.

При расчетах использовалась стандартная техника КЭ решения задач пьезоэлектричества с акустическими средами, описанная в документации по ANSYS APDL и, например, в [3] с конечными элементами PLANE13 с опцией пьезоэлектрического анализа и FLUID29. Примеры КЭ сетки приведены на рис. 1 (*б*), (*в*), где на рис. 1 (*б*) в области пьезоизлучателя различными цветами показаны конечные элементы с элементными системами координат, повернутыми вдоль радиальных направлений, а на рис. 1 (*в*) синим цветом выделены акустические элементы с опцией контакта с твердотельными элементами.

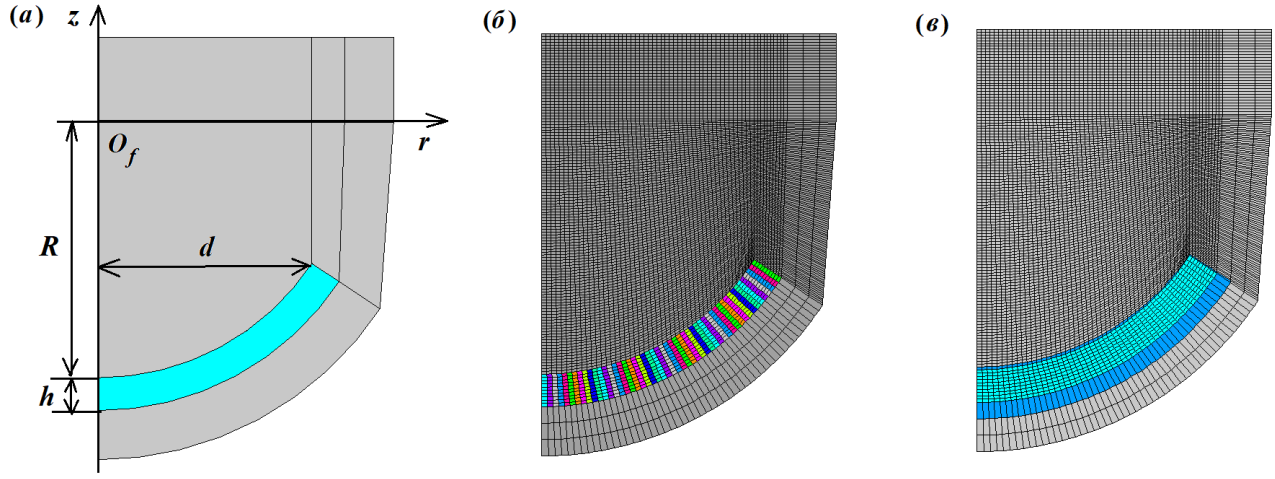


Рис. 1. Геометрия меридионального сечения модели (*а*), КЭ сетка с расцветкой по элементным системам координат (*б*) и КЭ сетка с расцветкой по типам элементов (*в*)

Расчеты проводились в режиме установившихся колебаний в окрестности первых электрически активных частот электрического резонанса и антирезонанса при двух вариантах возбуждения волн гармонически меняющейся разностью потенциалов на электродах амплитуды ΔV=100 (В) или осциллирующим электрическим зарядом Q=0.6·10^{-6} Кл на одном электроде при заземленном втором электроде.

2 Результаты и обсуждение

На рис. 2 приведены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) модуля электрического адмиттанса Y на электродах (*а*) и акустического давления p в фокальной точке O_f (*б*) для трех вариантов пьезокерамического материала пьезоизлучателя при возбуждении колебаний разностью потенциалов. Как видно, максимумы этих величин наблюдаются вблизи частот электрических резонансов, и хотя максимумы адмиттанса заметно меньше для пористой пьезокерамики (варианты 2 и 3), чем для плотной (вариант 1), но максимумы акустического давления оказываются приблизительно одинаковыми.

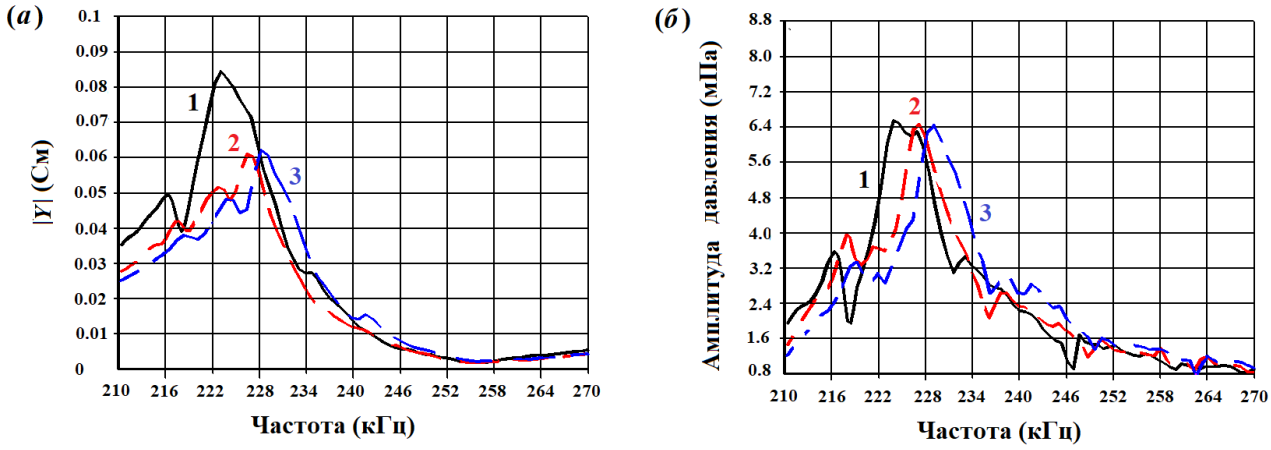


Рис. 2. Амплитуды адмиттанса в пьезоизлучателе (*а*) и давления в фокусе в акустической среде (*б*) при возбуждении колебаний разностью потенциалов

На рис. 3 приведены АЧХ модуля электрического импеданса Z (*а*) и акустического давления в точке O_f (*б*) для трех вариантов пьезокерамического материала при возбуждении колебаний электрическим током (зарядом). Из рис. 3 видно, что максимумы этих величин находятся вблизи частот электрических антирезонансов. Здесь также можно отметить, что хотя максимумы АЧХ импеданса заметно меньше для пористой пьезокерамики, чем для плотной, максимумы акустического давления оказываются достаточно близкими, причем для варианта 2 однородно поляризованной пьезокерамики максимум давления даже больше, чем для плотной.

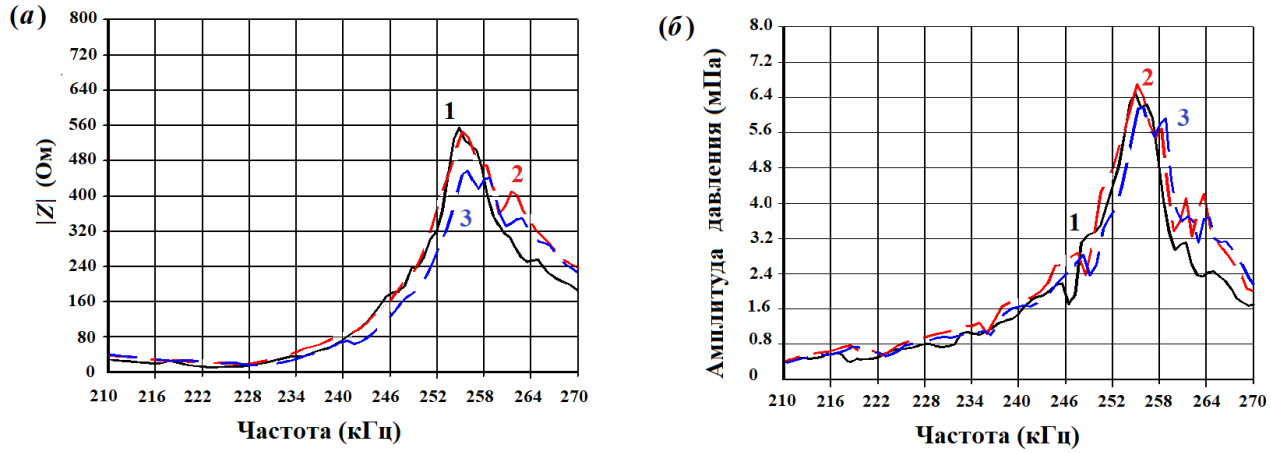


Рис. 3. Амплитуды импеданса в пьезоизлучателе (*а*) и давления в фокусе в акустической среде (*б*) при возбуждении колебаний электрическим током или зарядом

Как можно заметить, при обоих вариантах возбуждения колебаний использование пористой пьезокерамики приводит к достаточно хорошим результатам для поля акустического давления, особенно для варианта однородно поляризованной пьезокерамики.

Заключение

В силу ограниченности объема здесь представлена только небольшая часть проведенных исследований. В частности, не приведены результаты анализа пьезоизлучателей с другой

пористостью пьезокерамического материала, пьезоизлучателей с переходными слоями, результаты расчетов нестационарных задач при импульсном возбуждении, а также сравнение численных и экспериментальных данных для частных случаев. Эти результаты, как и приведенные в [3-6] и др. работах, демонстрируют перспективность использования пористой пьезокерамики в системах фокусирующего ультразвука, в гидроакустике и в пьеогенераторах «зеленой» энергии.

Работа выполнена при поддержке РНФ в рамках проекта № 22-11-00302-П, https://rscf.ru/project/22-11-00302/, в Южном федеральном университете.

Список литературы

1. *Bai X., Wang D., Zhen L., Cui M., Liu J., Zhao N., Lee C., Yang B*. Design and micromanufacturing technologies of focused piezoelectric ultrasound transducers for biomedical applications // Int. J. Extreme Manuf. 2024. **6**, N 6. P. 062001.
2. *Levassort F., Holc J., Ringgaard E., Bove T., Kosec M., Lethiecq M*. Fabrication, modelling and use of porous ceramics for ultrasonic transducer applications // J. Electroceram. 2007. **19**. P. 127.
3. *Домашенкина Т.В., Наседкин А.В., Рыбянец А.Н.* Конечно-элементный анализ фокусирующего ультразвукового пьезоизлучателя в режиме установившихся колебаний // Изв. ЮФУ. Техн. науки. 2010. № 6 (107). С. 174.
4. *Швецов И.А., Щербинин С.А., Астафьев П.А., Мойса М.О., Рыбянец А.Н*. Численное моделирование и оптимизация акустических полей и конструкций фокусирующих ультразвуковых преобразователей высокой интенсивности // Изв. РАН. Сер. Физ. 2018. **82**, № 3. С. 405.
5. *Rybyanets A.N., Shvetsov I.A., Petrova E.I., Lugovaya M.A., Shvetsova N.A*. Numerical simulation and optimization of acoustic fields and designs of composite HIFU transducers // Ferroelectrics. 2019. **543**, N 1. P. 48.
6. *Shvetsov I.A., Shcherbinin S.A., Shvetsova N.A., Petrova E.I., Rybyanets A.N*. Experimental study of high intensity focused ultrasonic fields generated by piezocomposite transducers // Ferroelectrics. 2019. **539**, N 1. P. 118.
7. *Наседкин А.В., Наседкина А.А., Толмачева Я.В.* Компьютерная гомогенизация пористых пьезокерамик различной сегнетожесткости при случайной структуре пористости и неоднородности поля поляризации // Вычислит. мех. спл. сред. 2023. **16**, № 4. С. 476.

УДК: 534.2. DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39688

Измерение диаграммы направленности низкочастотных излучателей воздушного ультразвука, предназначенных для использования в качестве элементов антенных решёток

Е.А. Петров[1,a], А.В. Лапина[2,b], С.А. Цысарь[2,c], Н. Гогмачадзе[1,d], О.А. Сапожников [1,e]

[1] *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, кафедра акустики. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2*

[2] *Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, физический факультет, кафедра нанофотоники. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2*

E-mail: [a]epetmail03@gmail.com, [b]lapinaav@my.msu.ru, [c]sergey@acs366.phys.msu.ru, [d]gogmachadzen-@my.msu.ru, [e]oleg@acs366.phys.msu.ru

Аннотация: В работе исследованы диаграммы направленности одиночных низкочастотных ультразвуковых пьезопреобразователей, предназначенных для создания мощных многоэлементных антенных решёток в воздухе. Разработана специальная измерительная установка, включающая в себя систему точного углового позиционирования UMS-3 (Precision Acoustics, Великобритания), обеспечивающую проведение измерений ультразвукового сигнала при изменении угла ориентации датчика в диапазоне от −90° до +90°, с шагом 1°. Измерения проводились в диапазоне частот 25 – 40 кГц. В работе произведено сравнение результатов эксперимента с теоретическим приближением диаграммы направленности круглого поршня, описываемого функцией Бесселя. Показано соответствие экспериментальных данных и аналитической зависимости. Полученные результаты позволяют корректно проектировать мощные многоэлементные антенные решётки для различных задач воздушной акустики.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №25-12-00141.

Ключевые слова: диаграмма направленности, низкочастотный ультразвук, антенные решетки.

Measurement of the directivity diagram of low-frequency aerial ultrasound transducers intended for use as elements of antenna arrays

E.A. Petrov[1,a], A.V. Lapina[2,b], S.A. Tsysar[2,c], N. Gogmachadze[1,d], O.A. Sapozhnikov[1,e]

[1] *Department of Acoustics, Faculty of Physics, M.V. Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia*

[2] *Department of Nanophotonics, Faculty of Physics, M.V. Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia*

E-mail: [a]epetmail03@gmail.com, [b]lapinaav@my.msu.ru, [c]sergey@acs366.phys.msu.ru, [d]gogmachadzen-@my.msu.ru, [e]oleg@acs366.phys.msu.ru

Abstract: The directivity diagrams of single low-frequency ultrasonic piezoelectric transducers designed to create powerful multi-element antenna arrays in the air are studied. A special measuring system has been developed that includes the UMS-3 precision angular positioning system (Precision Acoustics, Great Britain), which provides measurements of the ultrasonic signal when the sensor orientation angle changes in the range from −90° to +90°, in increments of 1°. The measurements were carried out in the frequency range of 25 – 40 kHz. The experimental results are compared with a theoretical approximation of the directivity diagram of a circular piston described by the Bessel function. The correspondence of experimental data and analytical dependence is shown. The results obtained make it possible to correctly design powerful multi-element antenna arrays for various aerial acoustics tasks.

This work was supported by the Russian Science Foundation (project no. 25-12-00141).

Keywords: directivity diagram, low-frequency ultrasound, antenna arrays.

УДК: 534.18 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39689

Обзор применения акустических методов интенсификации добычи нефти в сложных коллекторах

Б.Б. Дамдинов[1,2,a], В.А. Пригожих[1,b]

[1]Сибирский федеральный университет, 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79

[2]Институт физического материаловедения СО РАН, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 8

E-mail: [a]bdamdinov@sfu-kras.ru, [b]vprigozhikh@sfu-kras.ru

В обзоре рассмотрены акустические методы воздействия на капиллярно-защемленные углеводороды в качестве возможной альтернативы технике гидроразрыва пласта. Отмечена их привлекательность – низкие энергозатраты и высокая экологичность. Показано, что широкому внедрению акустических технологий препятствует дефицит систематических фундаментальных разработок математических моделей, опробованных на фактических данных.

Ключевые слова: акустические методы, флюид, снижение вязкости, интенсификация добычи, уменьшение капиллярного давления.

PACS 43.35.Bf

An overview of the application of acoustic methods for intensifying oil production in complex reservoirs

B.B. Damdinov[1,2,a], V.A. Prigozhikh[1,b]

[1]Siberian Federal University, 660041, Krasnoyarsk, Pr. Svobodny 79

[2]Institute of Physical Materials Science SB RAS, 670047, Ulan-Ude, Sakhyanova St., 8

E-mail: [a]bdamdinov@sfu-kras.ru, [b]vprigozhikh@sfu-kras.ru

The review considers acoustic methods of influencing capillary-trapped hydrocarbons as a possible alternative to hydraulic fracturing techniques. Their attractiveness is noted – low energy consumption and high environmental friendliness. It is shown that the widespread adoption of acoustic technologies is hindered by the lack of systematic fundamental developments of mathematical models tested on evidence.

Keywords: acoustic methods, fluid, viscosity reduction, mining intensification, capillary pressure reduction

Введение

Мировой нефтегазовый сектор сейчас фактически полностью переходит к работе с трудноизвлекаемыми запасами. Это глобальный тренд. Сегодня их доля в мировом балансе уже превысила 60%. Если рассматривать ситуацию в Красноярском крае, например, на месторождениях Ванкорского кластера или Юрубчено-Тохомской зоны, то здесь многие объекты уже зашли в позднюю стадию разработки. Проблема в том, что там формируются обширные зоны капиллярно-защемлённой нефти, а в структуре остаточных запасов её доля достигает 70–80%. Сейчас в отрасли доминирует многозабойный гидроразрыв пласта (ГРП). Метод эффективен, порой даже революционен, но у него есть свои пределы: высокая стоимость, риски для экологии (особенно в Арктике) и малый радиус воздействия. ГРП просто не позволяет «достать» флюид в тех блоках пласта, которые удалены от основных трещин. Здесь возникает потребность в гибридных решениях. Нужны технологии, способные воздействовать на нефть на микроуровне. Акустические методы в этом плане – отличная альтернатива. Причина простая: они потребляют минимум энергии и почти не создают нагрузку на окружающую среду.

Современное состояние исследований акустических методов нефтедобычи

Данные пилотных испытаний и экспериментов в лабораториях говорят о том, что акустические колебания действительно работают. Они снижают капиллярное давление, разжижают вязкую нефть и разрушают отложения парафинов. По сути, мы наблюдаем изменение межфазного натяжения, когда упругие волны ремобилизуют защемленные углеводороды, заставляя их снова двигаться. В основе понимания процессов лежит классическая теория Биота [1]. Позже её развили для двухфазных систем [2, 3], и это стало фундаментом для описания того, как волна проходит через насыщенную пористую среду. У сегодняшних ученых широкий спектр задач в области ультразвуковых технологий увеличение нефтедобычи. Это лабораторные эксперименты на микрофлюидных устройствах, изучение механизмов физического воздействия акустики (от кавитации до изменения реологии и сдвиговых напряжений), гибридные методы увеличение нефтедобычи и акустики и, конечно, проверка гипотез на образцах керна и в поле. В России у этого направления устойчивая научная традиция. Теорию во многом сформировали в ИПМех РАН. Именно там создали модели, которые объясняют, как упругая волна разрушает капиллярные ловушки. Прикладную сторону вопроса, куда входят виброакустические методы стимуляции призабойной зоны, развивают в Губкинском университете. Натурными испытаниями акустических излучателей в скважинах Западной Сибири сейчас плотно занимается Тюменский научный центр СО РАН. В работах [4, 5] показано, что ультразвук влияет на пласт

комплексно. Он снижает вязкость нефти, разрушает асфальтено-смолистые структуры и очищает поровое пространство. В результате повышается проницаемость и эффективность вытеснения, и это подтверждено экспериментально. Интересный способ описан в работе [6]. Ученые выполняли акустико-химическую обработку призабойной зоны. Этим способом они решали сразу две задачи: модифицировали свойства флюида и структуру пласта, плюс ограничивали водоприток. Более поздние публикации сместили акцент на методы акустической стимуляции и их математическое моделирование. Расчеты исследователей показали, что учет параметров насыщения и волновых эффектов позволяет прогнозировать изменение фильтрационных характеристик пласта с гораздо большей точностью. Иной подход предложили авторы работы [7]. Они создали и успешно испытали в реальных условиях скважинный излучатель на базе резонатора Гельмгольца и получили уже не лабораторный прототип, а готовое техническое решение.

Научный коллектив Сибирского федерального университета сейчас работает над несколькими задачами одновременно. Помимо создания рецептур эмульсий и микрофлюидных опытов (грант РНФ № 23-79-30022, госзадание № FSRZ 2020–0012), мы изучаем акустику дисперсных систем. Важная часть работы – это прямая визуализация распространения звуковых волн в суспензиях и эмульсиях (рис. 1).

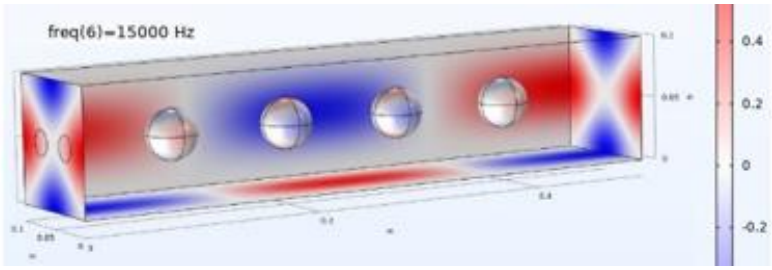


Рис.1. Результат численного моделирования, видны перепады акустического давления на стенках сосуда и на поверхностях пузырьков воздуха.

Заключение

Выполненных работ и публикаций по этой теме очень много, в нашем обзоре, конечно, только малая часть. Но некоторые выводы мы сделать можем. Имеется действительно множество исследований и разработок. Российская научная школа здесь имеет хороший баланс теоретической базы и прикладной составляющей. Но чего не хватает – это фундаментальных математических моделей, которые бы описывали, как акустика воздействует на капиллярно-защемлённые углеводороды. Такие модели должны быть верифицированы на данных микрофлюидных экспериментов.

При поддержке Сибирского федерального университета (госзадание № FSRZ 2020–0012).

Список литературы

1. Biot, M.A. (1956) Theory Propagation of Elastic Waves in a Fluid-Saturated Porous Solid I. Low-Frequency Range. The Journal of the Acoustical Society of America, 28, 168-178. https://doi.org/10.1121/1.1908239.

2 Lo W.-C., Sposito G., Majer E. Wave propagation through elastic porous media containing two immiscible fluids // Water Resources Research. 2005. Vol. 41, No. 2. Art. no. W02025. https://doi.org/10.1029/2004WR003162.

3. Xiong F., Liu J., Guo Z., Liu J. Wave Equations of Porous Media Saturated With Two Immiscible Fluids Based on the Volume Averaging Method // Frontiers in Earth Science. 2021. Vol. 9. Art. no. 618909. https://doi.org/10.3389/feart.2021.618909.

4. Гуляев Д. Н., Лазуткина Н. Е., Жуйков Ю. Ф., Ильинский А. В., Рухман А. А., Шиканов А. Е., Шиканов Е. А. Исследование ультразвукового воздействия на нефтяной пласт // Нефтяное хозяйство. 2018. № 8. С. 60–63. DOI: 10.24887/0028-2448-2018-8-60-63.

5. Алфаяад А. Г. Х., Валиев Д. З., Кемалов Р. А., Риффель Д. В., Брызгалов Н. И. Применение ультразвукового воздействия для повышения нефтеотдачи // Технологии нефти и газа. 2023. № 2 (145). С. 36–43.

6. Кондратюк, А. А. Обоснование акустико-химической обработки призабойной зоны пласта для интенсификации добычи нефти и ограничения водопритока к скважине / А. А. Кондратюк, К. И. Бабицкая // Инженер-нефтяник. – 2024. – № S5. – С. 83-89. – EDN DGIJJL.

7. Марфин, Е. А. Акустическая стимуляция добычи трудноизвлекаемых запасов нефти / Е. А. Марфин // Трудноизвлекаемые запасы нефти: Материалы ежегодной международной конференции, Альметьевск, 24 сентября 2025 года. – Альметьевск: Альметьевский государственный нефтяной институт, 2025. – С. 335-338.

УДК 534.2 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39690

Аномальная упругая и электромеханическая дисперсия в пористой пьезокерамике

Н.А. Швецова[1], М.А. Луговая[1], И.А. Швецов[1], Н.А. Колпачева[2], А.Н. Рыбянец[1,*]

[1]Южный федеральный университет, Научно-исследовательский институт физики, 344090, Ростов-на-Дону, Россия

[2]Донской государственный технический университет, 344002, Ростов-на-Дону, Россия

*E-mail: *arybyanets@gmail.com*

Аннотация: В последние годы требования к функциональным характеристикам ультразвуковых и пьезоэлектрических преобразователей, а также пьезоэлектрических материалов существенно изменились в связи с расширением областей их применения, включая медицинскую диагностику и терапию, сбор рассеянной энергии, подводную акустику, неразрушающий контроль и др. Одним из перспективных материалов для ультразвуковых преобразователей является пористая пьезокерамика на основе различных пьезокерамических составов. В настоящей работе проведено сравнительное исследование комплексных упругих и электромеханических характеристик и их частотных зависимостей пористых и плотных пьезокерамических образцов идентичного химического состава $Pb_{0.95}Sr_{0.05}Zr_{0.53}Ti_{0.47}O_3$ с добавкой 1 wt.% Nb_2O_5. Анализ частотных зависимостей комплексных характеристик пористой пьезокерамики выявил зоны аномальной упругой и электромеханической дисперсии. Показано, что причиной аномальной дисперсии упругих и электромеханических характеристик пористой пьезокерамики является изменение соотношения между характерным масштабом пространственной неоднородности коралловидного пьезокерамического каркаса и длиной волны резонансных колебаний пьезоэлемента. Полученные результаты позволили определить частотные диапазоны применения пористых пьезокерамических элементов, обеспечивающие высокую электромеханическую эффективность ультразвуковых преобразователей.

Ключевые слова: пористая пьезокерамика, комплексные характеристики, упругая и электромеханическая дисперсия, пьезокерамический каркас, резонансные колебания.

Anomalous elastic and electromechanical dispersion in porous piezoceramics

N.A. Shvetsova[1], M.A. Lugovaya[1], I.A. Shvetsov[1], N.A. Kolpacheva[2], A.N. Rybyanets[1,*]

[1]Research Institute of Physics, Southern Federal University, Rostov-on-Don, 344090, Russia

[2]Physics Department, Don State Technical University, Rostov-on-Don, 344002, Russia

*E-mail: *arybyanets@gmail.com*

Abstract: In recent years, the requirements for the functional characteristics of ultrasonic and piezoelectric transducers, as well as piezoelectric materials, have changed significantly due to the expansion of their application areas, including medical diagnosis and therapy, energy harvesting, underwater acoustics, non-destructive testing, etc. One of the promising materials for ultrasonic transducers is porous piezoceramics based on various piezoceramic compositions. This paper presents a comparative study of the complex elastic and electromechanical characteristics and their frequency dependencies for porous and dense piezoceramic samples of identical chemical composition $Pb_{0.95}Sr_{0.05}Zr_{0.53}Ti_{0.47}O_3$ doped with 1 wt.% Nb_2O_5. Analysis of the frequency dependencies of the complex characteristics of porous piezoceramics revealed regions of anomalous elastic and electromechanical dispersion. It is shown that the cause of the anomalous dispersion of the elastic and electromechanical characteristics of porous piezoceramics is the change in the ratio of the characteristic scale of spatial inhomogeneity of the coral-like piezoceramic framework to the wavelength of resonant vibrations of the piezoelectric element. The obtained results enable the determination of frequency ranges for the application of porous piezoceramic elements that ensure high electromechanical efficiency of ultrasonic transducers.

Keywords: porous piezoceramics, complex characteristics, elastic and electromechanical dispersion, piezoceramic frame, resonant vibrations.

PACS: 43.35.Cg; 43.35.Yb; 62.20.Dc; 77.84.Dy

Введение

В последние годы требования к инновационным ультразвуковым и пьезоэлектрическим датчикам и преобразователям существенно изменились в связи с расширением областей их применения, включая сбор рассеянной энергии, медицинскую диагностику и терапию, подводную акустику, неразрушающий контроль и другие [1–3]. Эти современные задачи предъявляют повышенные требования к функциональным характеристикам, что стимулирует

активную разработку новых пьезоэлектрических материалов и технологий их изготовления [4, 5].

Особое внимание в последнее время уделяется пористой пьезокерамике на основе различных составов – относительно новому и перспективному классу пьезоэлектрических материалов. Благодаря своим уникальным свойствам такие материалы находят применение в ультразвуковых преобразователях и сенсорах для медицинской диагностики и терапии, неразрушающего контроля, подводной акустики и других высокотехнологичных областях [6, 7]. В частности, недавно были предложены сегнетожесткие пористые пьезокерамики в качестве перспективного материала для преобразователей в системах высокоинтенсивного фокусированного ультразвука (HIFU), что открывает новые возможности для развития данной технологии [8, 9].

Вместе с тем дисперсионные явления, а также диэлектрические, упругие и электромеханические потери существенно ограничивают применимость пьезоматериалов в высокочастотных ультразвуковых, пьезоэлектрических и акустоэлектронных устройствах [10]. Различные аспекты, связанные с упругими потерями и дисперсией в пористых пьезокерамиках и пьезокомпозитах, активно исследуются в современной литературе [11]. Однако, несмотря на достигнутые успехи, ряд вопросов остается недостаточно изученным, в частности, не исследованы частотные зависимости комплексных упругих и электромеханических параметров, а также неясны микроструктурные и физические механизмы, ответственные за потери и дисперсию в пористых пьезокерамиках.

В работах [9, 12, 13] были опубликованы предварительные экспериментальные данные, касающиеся влияния микроструктурных особенностей и относительной пористости на комплексные параметры плотных и пористых пьезокерамик на основе твердых растворов системы цирконата-титаната свинца (ЦТС).

Целью настоящей работы являлось установление микроструктурных и физических механизмов, ответственных за упругие и электромеханические потери, а также дисперсионные эффекты в плотной и пористой пьезокерамике системы ЦТС.

1 Объекты и методы исследования

Для сравнительного исследования комплексных электромеханических параметров и их частотных зависимостей были использованы образцы пористой пьезокерамики на основе твердых растворов системы ЦТС состава $Pb_{0.95}Sr_{0.05}Zr_{0.53}Ti_{0.47}O_3$ с добавкой 1 мас.% Nb_2O_5 с относительной пористостью в диапазоне от 5% (остаточная пористость плотной пьезокерамики, полученной обычным спеканием) до 40% (пористость, полученная методом выжигания порообразователя). Образцы представляли собой тонкие диски толщиной

1.2 – 1.9 мм и диаметром 26.3 мм, полученные методом твердофазного синтеза с последующим спеканием, а также с применением модифицированной технологии выжигания порообразующих добавок [6, 9].

Наборы комплексных упругих и электромеханических параметров исследуемых пьезокерамик с различной относительной пористостью были получены посредством анализа пьезорезонансных спектров, измеренных для толщинной и радиальной модах колебаний стандартных дисковых образцов с помощью прецизионного анализатора импеданса Agilent 4294A и специализированного программного обеспечения Piezoelectric Resonance Analysis Program (PRAP) [14].

Частотные зависимости комплексных параметров исследуемых пьезокерамик были получены с использованием разработанного ранее метода, основанного на анализе пьезорезонансных спектров, измеренных для основного резонанса и высших гармоник толщинных колебаний экспериментальных образцов, измеренных в диапазоне частот от 100 кГц до 25 МГц [9, 11–13].

2 Экспериментальные результаты и обсуждение

Для уточнения механизмов упругих и электромеханических потерь, а также оценки потенциала применения пористой и плотной пьезокерамики в высокочастотных ультразвуковых устройствах были исследованы зависимости действительной и мнимой частей комплексного упругого модуля C_{33}^{D} и коэффициента электромеханической связи k_t от частоты.

Частотные зависимости действительной и мнимой частей комплексного коэффициента связи k_t и модуля упругости C_{33}^{D} для исследованных пьезокерамик с различной степенью пористости, полученные с использованием PRAP-анализа пьезорезонансных спектров, представлены на рисунках 1 и 2.

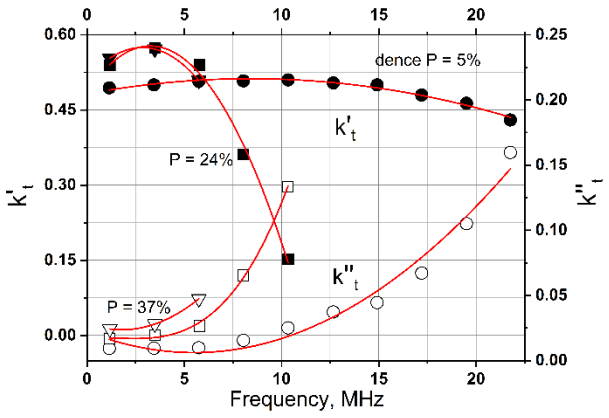


Рис. 1. Зависимости от частоты действительной (k_t') и мнимой (k_t'') частей комплексного коэффициента электромеханической связи k_t плотной (сплошные и открытые круги), а также пористой пьезокерамики с пористостью 24% (сплошные и открытые квадраты) и 37% (сплошные и открытые треугольники).

Из рисунка 1 видно, что действительная часть коэффициента электромеханической связи k_t' плотной пьезокерамики демонстрирует практически линейную частотную зависимость с более выраженным спадом при частотах выше 12 МГц. В то же время мнимая часть k_t'' коэффициента электромеханической связи плотной пьезокерамики возрастает квадратично с увеличением частоты (рис. 1). Такой квадратичный рост мнимой части k_t'' в основном обусловлен внутренним трением в пьезокерамике, поскольку потери на рэлеевское рассеяние [11] пренебрежимо малы благодаря мелкозернистой структуре материала.

Из рис. 1 также следует, что действительная часть коэффициента электромеханической связи k_t' пористой пьезокерамики проявляет выраженную нелинейную частотную зависимость. В частности, k_t' быстро возрастает в диапазоне до 4 МГц, после чего резко уменьшается с дальнейшим ростом частоты. Как было показано ранее [6], коэффициент электромеханической связи k_t' увеличивается с ростом пористости, приближаясь к значению k_{33}', характерному для пьезокерамических стержней. Такое поведение обусловлено частичным ослаблением поперечного механического зажатия пьезокерамического каркаса пористой пьезокерамике. Таким образом, быстрый начальный рост k_t' для пористой пьезокерамики, наблюдаемый на рис. 1, обусловлен изменением соотношения между характерным масштабом пространственной неоднородности керамического каркаса и длиной волны резонансных колебаний пьезоэлемента при увеличении частоты. В результате этого вклад квазистержневых компонентов в значение k_t' усиливается, что приводит к его постепенному приближению к величине k_{33}' по мере роста частоты.

Мнимая часть коэффициента электромеханической связи k_t'' растет с частотой квадратично и значительно быстрее, чем для плотной пьезокерамики. Поскольку потери, связанные с внутренним трением и рэлеевским рассеянием на зернах, одинаковы для плотных и пористых пьезокерамик с одинаковым химическим составом и размером зерен, более интенсивный рост k_t'' в пористых образцах, вероятно, связан со стохастическим рассеянием резонансных колебаний пьезоэлемента на рассеивающих объектах при условии $10D > \lambda > 4D$, где λ – длина волны, а D – характерный размер рассеивающих объектов [11]. В пористой пьезокерамике такими объектами могут выступать группы пор и мезоструктурные элементы коралловидного каркаса ($D > 30$ мкм).

Таким образом, резкое, практически квадратичное возрастание электромеханических потерь на частотах выше 5 МГц, обусловленное стохастическим рассеянием упругих колебаний на порах и мезоструктурных элементах пористого каркаса, может служить основной причиной последующего быстрого снижения действительной части коэффициента электромеханической связи k_t' с дальнейшим ростом частоты (рис. 1).

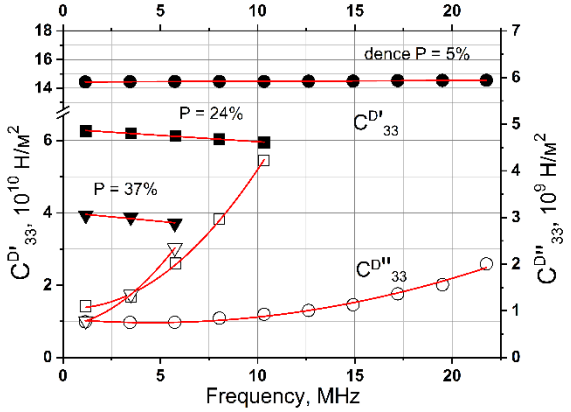


Рис. 2. Зависимости от частоты действительной ($C_{33}^{D\prime}$) и мнимой ($C_{33}^{D\prime\prime}$) частей комплексного модуля упругости C_{33}^{D} для плотной (сплошные и открытые круги), а также пористой пьезокерамики с пористостью 24% (сплошные и открытые квадраты) и 37% (сплошные и открытые треугольники).

Анализ рисунка 2 показывает существенное различие в частотных зависимостях действительной $C_{33}^{D\prime}$ и мнимой $C_{33}^{D\prime\prime}$ частей комплексного модуля упругости для плотной и пористой пьезокерамики. В плотной пьезокерамике наблюдается нормальная упругая дисперсия: значение действительной части упругого модуля $C_{33}^{D\prime}$, а соответственно и скорости звука $V_t^D = \sqrt{C_{33}^{D\prime}/\rho}$, практически линейно увеличиваются с ростом частоты.

Поведение мнимой части упругого модуля $C_{33}^{D\prime\prime}$ для плотной пьезокерамики связано с тем, что затухание резонансных колебаний возрастает с частотой практически по квадратичному закону. Данное затухание в основном обусловлено внутренним трением, то есть диссипативными потерями, присущими самому пьезокерамическому материалу. Потери, обусловленные рэлеевским рассеянием упругих волн на зернах плотной пьезокерамики, пренебрежимо малы вследствие мелкозернистой структуры исследованных образцов и относительно низкому диапазону измеряемых частот.

В отличие от плотной керамики, действительная часть модуля упругости $C_{33}^{D\prime}$ пористой пьезокерамики монотонно убывает с увеличением частоты, демонстрируя аномальное поведение. При этом чем выше относительная пористость образца, тем более выраженным оказывается снижение действительной части $C_{33}^{D\prime}$. В свою очередь, мнимая часть модуля $C_{33}^{D\prime\prime}$ возрастает квадратично и значительно быстрее по сравнению с плотным материалом (рис. 2). Такое поведение, как уже указывалось, объясняется стохастическим рассеянием резонансных колебаний на порах и других неоднородностях мезоструктуры пористого каркаса.

Принимая во внимание микроструктурные особенности пористой пьезокерамики, в частности наличие трехмерного каркаса коралловидной формы с развитой сетью квазистержневых элементов, аномальное уменьшение модуля упругости $C_{33}^{D\prime}$ и соответственно скорости звука $V_t^D = \sqrt{C_{33}^{D\prime}/\rho}$ с ростом частоты можно объяснить увеличением вклада

квазистержневых компонентов в упругий отклик, приводящего к переходу V_t^D (скорость, отвечающая толщинным колебаниям пьезокерамического диска) → V_{33}^D (скорость, характерная для продольных колебаний длинного пьезокерамического стержня)в области высоких частот.

С ростом частоты длина волны уменьшается, что приводит к усилению влияния мезоструктурных квазистержневых компонентов (агрегатов кристаллитов, преимущественно ориентированных вдоль направления остаточной поляризации пористого пьезоэлемента) на его комплексные электромеханические характеристики [6, 12, 13].

Заключение

Исследования комплексных параметров и их частотных зависимостей пористых и плотных образцов, изготовленных из пьезокерамики системы ЦТС одинакового химического состава $Pb_{0.95}Sr_{0.05}Zr_{0.53}Ti_{0.47}O_3$ с добавкой 1 wt.% Nb_2O_5, показало, что определяющую роль в формировании упругих и электромеханических свойств пористого материала играют мезоструктурные квазистержневые компоненты пьезокерамического каркаса. Эти компоненты представляют собой агрегаты кристаллитов, ориентированных преимущественно вдоль направления остаточной поляризации пьезокерамического образца.

Анализ частотных зависимостей комплексных характеристик пористой пьезокерамики выявил зоны аномальной упругой и электромеханической дисперсии. Показано, что причиной аномальной дисперсии упругих и электромеханических характеристик пористой пьезокерамики является изменение соотношения между характерным масштабом пространственной неоднородности коралловидного пьезокерамического каркаса и длиной волны резонансных колебаний пьезоэлемента. Полученные результаты позволяют определить частотные диапазоны эксплуатации пьезокерамических элементов в высокочастотных ультразвуковых устройствах, обеспечивающие высокую электромеханическую эффективность.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности. Проект № FENW-2026-0027).

Список литературы

1. *Horchidan N., Ciomaga C.E., Frunza R.C., Capiani C., Galassi C., Mitoseriu L.* A comparative study of hard/soft PZT-based ceramic composites // Ceram. Int. 2016. **42**. P. 9125.

2. *Safari A., Akdoğan E.K., Leber J.D*. Ferroelectric ceramics and composites for piezoelectric transducer applications // Jpn. J. Appl. Phys. 2022. **61.** SN0801.

3. *Turner B., Cranston D.* A Review of High-Intensity Focused Ultrasound // Int. J. Transl. Med. 2024. **4**. P. 197.

4. *Zhang B., Yang Y., Fan X*. Processing, microstructure, and properties of porous ceramic composites with directional channels // J. Mater. Sci. Technol. 2024. **168.** P. 1.

5. *Shrivastava Sh., Rajak D.K., Joshi T., Singh D.K., Mondal D.P*. Ceramic Matrix Composites: Classifications, Manufacturing, Properties, and Applications // Ceramics. 2024. **7**. P. 652.

6. *Rybyanets A.N*. Porous piezoceramics: theory, technology, and properties // IEEE Trans. UFFC. 2011. **58**. P. 1492.

7. *Ma W., Zhou X., Gao H., Wang C., Tan H., Samart C., Wang J., An T.N., Yan C., Hu Y., Wang J., Zhang H*. Structure-reinforced periodic porous piezoceramics for ultrahigh electromechanical response manufactured by vat photopolymerization // Additive Manufacturing. 2024. **93**. P. 104446.

8. *Rybyanets A.N*. New methods and transducer designs for ultrasonic diagnostic and therapy // In "Advanced Materials: Manufacturing, Physics, Mechanics and Applications". Springer Proceedings in Physics, New York, 2016. P. 603.

9. *Швецова Н.А., Швецов И.А., Петрова Е.И., Макарьев Д.И., Мараховский М.А., Рыбянец А.Н*. Комплексные электромеханические параметры и особенности микроструктуры пористой пьезокерамики системы ЦТС // Изв. РАН. Сер. Физ. 2024. **88**, № 5. С. 705.

10. *Park Y., Choi M., Uchino K*. Loss Determination Techniques for Piezoelectrics: A Review // Actuators. 2023. **12**. P. 213.

11. *Lugovaya M.A., Shvetsov I.A., Shvetsova N.A., Nasedkin A.V., Rybyanets A.N*. Elastic Losses and Dispersion in Porous Piesoceramics // Ferroelectrics. 2021. **571**, N 1. P. 263.

12. *Shvetsov I.A., Lugovaya M.A., Konstantinova M.G., Abramov P.A., Petrova E.I., Shvetsova N.A., Rybyanets A.N*. Dispersion characteristics of complex electromechanical parameters of porous piezoceramics. J. Adv. Diel. **12**(2), 2160004 (5 pages) (2022).

13. *Rybyanets A.N., Shvetsov I.A., Shvetsova N.A., Marakhovsky M.A., Kolpacheva N.A.* Microstructure, complex electromechanical parameters and dispersion characteristics of ferroelectrically "hard" piezoceramics // J. Adv. Diel. 2025. **15**, N 3. P. 2540001.

14. PRAP (Piezoelectric Resonance Analysis Program). (TASI Technical Software Inc., 2000-2018), www.tasitechnical.com. Дата обращения 01.04.2026.

УДК 534.7; 534.292 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39691

Экспериментальное исследование акустических полей фокусирующих ультразвуковых преобразователей

Луговая М.А., Швецов И.А., Петрова Е.И., Константинова М.Г., Рыбянец А.Н.*

Южный федеральный университет, Научно-исследовательский институт физики, 344090, Ростов-на-Дону, Россия
*E-mail: *arybyanets@gmail.com*

Аннотация: Достижения в области физической акустики, методов визуализации и обработки изображений, пьезоэлектрических материалов и конструкций ультразвуковых преобразователей привели к появлению новых методов и оборудования для ультразвуковой диагностики, терапии и эстетической медицины. Высокоинтенсивный фокусированный ультразвук (HIFU) продолжает оставаться привлекательным вариантом для минимально инвазивных терапевтических процедур. В настоящей работе приведены результаты исследования влияния различных дефектов и неоднородностей формы и размеров фокусирующих пьезокерамических элементов, а также элементов конструкции ультразвуковых HIFU преобразователей на особенности формируемых ими акустических полей. Измерение и картирование акустических полей HIFU преобразователей производились в сканирующей ультразвуковой ванне UMS3 с использованием калиброванных игольчатых PVDF гидрофонных зондов, встроенного широкополосного усилителя и преобразователем постоянного тока. Экспериментальные результаты сопоставлены с результатами конечно-элементного моделирования профилей собственных колебаний пористых пьезоэлементов с использованием программного пакета ANSYS. Показано, что любые неоднородности формы и размеров фокусирующего пьезокерамического элемента, флуктуации рабочей частоты, а также конструктивные особенности преобразователей существенно влияют на параметры акустического поля. Эксперименты ex vivo на биологических тканях и акустических фантомах подтвердили результаты измерений и расчетов.

Ключевые слова: фокусирующий пьезоэлемент, HIFU преобразователь, акустическое поле, ультразвуковая ванна, гидрофон.

Experimental study of acoustic fields of focusing ultrasonic transducers

Lugovaya M.A., Shvetsov I.A., Petrova E.I., Konstantinova M.G., Rybyanets A.N.*

Research Institute of Physics, Southern Federal University, Rostov-on-Don, 344090, Russia
*E-mail: *arybyanets@gmail.com*

Abstract: Advances in physical acoustics, imaging and image processing methods, piezoelectric

materials, and ultrasonic transducer designs have led to the emergence of new techniques and equipment for ultrasonic diagnostics, therapy, and aesthetic medicine. High-intensity focused ultrasound (HIFU) continues to be an attractive option for minimally invasive therapeutic procedures. This paper presents the results of a study on the influence of various defects and inhomogeneities in the shape and dimensions of focusing piezoceramic elements, as well as structural components of ultrasonic HIFU transducers, on the characteristics of the acoustic fields they generate. Measurement and mapping of the acoustic fields of HIFU transducers were performed in a scanning ultrasonic bath UMS3 using calibrated needle PVDF hydrophone probes, a built-in broadband amplifier, and a DC converter. The experimental results were compared with finite-element modeling results of the eigenmode profiles of porous piezoelectric elements using the ANSYS software package. It is shown that any inhomogeneities in the shape and dimensions of the focusing piezoceramic element, fluctuations in the operating frequency, as well as design features of the transducers significantly affect the parameters of the acoustic field. Ex vivo experiments on biological tissues and acoustic phantoms confirmed the measurement and calculation results.

Keywords: focusing piezoelectric element, HIFU transducer, acoustic field, ultrasonic bath, hydrophone.

PACS: 87.19.Xx; 87.80.−y; 43.35.Yb

Введение

Достижения в области физической акустики, методов визуализации и обработки изображений, пьезоэлектрических материалов и конструкций ультразвуковых преобразователей [1, 2] привели к появлению новых методов и оборудования для ультразвуковой диагностики, терапии и эстетической медицины, а также к появлению новых областей применения.

Высокоинтенсивный фокусированный ультразвук (HIFU) остается привлекательным вариантом для минимально инвазивных терапевтических процедур. Абляционная терапия может быть использована для лечения ряда доброкачественных и злокачественных заболеваний с небольшим количеством побочных эффектов. За последние 15 лет был проведен огромный объем лабораторных работ и клинических испытаний, направленных на разработку устройств, которые могут обеспечить лечение с безопасными и эффективными результатами [1–4].

Преобразователи для HIFU терапии в последнее время обычно изготавливаются из пьезокерамики системы цирконата-титаната свинца (ЦТС) с низкими потерями или из пьезокомпозитов со связностью 1-3 и пористых пьезокерамик [5].

В настоящее время разработаны и используются различные методы фокусировки ультразвуковых волн [5, 6]. Самым простым и дешевым методом является самофокусировка, например, сферически вогнутым ультразвуковым преобразователем. Недавно для HIFU терапии было предложено использовать ультразвуковые фокусирующие преобразователи, представляющие собой фазированные решетки.

Поиск новых методов эффективной фокусировки ультразвука [5, 7, 8], которые позволяют управлять фокусом при сохранении низкого уровня боковых лепестков в области фокусировки продолжается и сейчас. Однако, несмотря на долгую историю исследований, экспериментальные данные о влиянии конструкции фокусирующих пьезокерамических преобразователей на особенности акустического поля на сегодняшний день не опубликованы.

В данной работе приведены результаты исследования влияния различных дефектов и неоднородностей формы и размеров фокусирующих композитных пьезокерамических элементов, а также элементов конструкции ультразвуковых HIFU преобразователей на особенности формируемых ими акустических полей.

1 Объекты и методы исследования

Объектом исследования являлись сферически фокусированные HIFU преобразователи, изготовленные из пористой пьезоэлектрической керамики. Сегнетожесткая пористая пьезокерамика на основе твердых растворов системы ЦТС (с относительной пористостью 18%) характеризуются высоким коэффициентом электромеханической связи и низким акустическим импедансом, обуславливающим акустическое согласование пьезоэлектрического преобразователя с иммерсионной жидкостью, полимерной мембраной и телом пациента [9, 10].

Пьезокерамические фокусирующие элементы характеризовались следующими размерами: внешний диаметр – 90 мм, радиус кривизны – 75 мм, диаметр центрального отверстия – 50 мм, толщина пьезоэлемента – 1.2 мм. Различные дефекты, такие как радиальная трещина или неравномерность толщины и т.п. были намеренно введены в конструкцию сферического фокусирующего пьезоэлемента, чтобы оценить их влияние на особенности акустического поля HIFU преобразователей. Пьезокерамический фокусирующий элемент устанавливался в герметичном дюралюминиевом корпусе, заполненном легким парафиновым маслом, снабженным контактами для подключения к генератору, капролоновым рупором и акустически прозрачной мембраной для выхода ультразвуковых волн, отверстием для установки визуализирующего датчика, отверстиями и заглушками для заполнения преобразователя маслом. С помощью иммерсионной жидкости и полимерной мембраны обеспечивался акустический контакт пористого пьезокерамического элемента с объектом, а

также его охлаждение. Ультразвук излучался через тонкую полиэтиленовую мембрану, покрывавшую излучающее фронтальное окно корпуса преобразователя.

Влияние конструкции и рабочих параметров HIFU преобразователей на особенности акустических полей было исследовано с помощью сканирующей системы UMS3 (Precision Acoustics Ltd.) [11]. Измерение и картирование акустических полей HIFU преобразователей производились в сканирующей ультразвуковой ванне UMS3 с использованием калиброванных игольчатых PVDF гидрофонных зондов, встроенного широкополосного усилителя и преобразователем постоянного тока. Ультразвуковая измерительная система управлялась с ПК с помощью программного обеспечения UMS. Цифровой осциллограф Agilent DSOX3024A и генератор Agilent 33521B использовались для возбуждения HIFU преобразователей и хранения данных.

2 Экспериментальные результаты и обсуждение

На рисунке 1 показаны результаты картирования распределения акустического давления в фокальной плоскости, создаваемого стандартным HIFU преобразователем с полиэтиленовой мембраной и резонансной частотой 1.6 МГц, возбуждаемым на разных частотах.

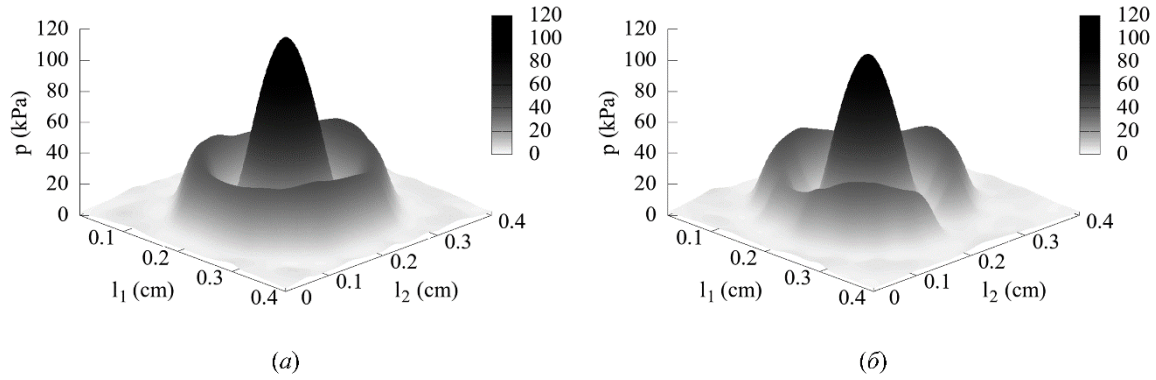


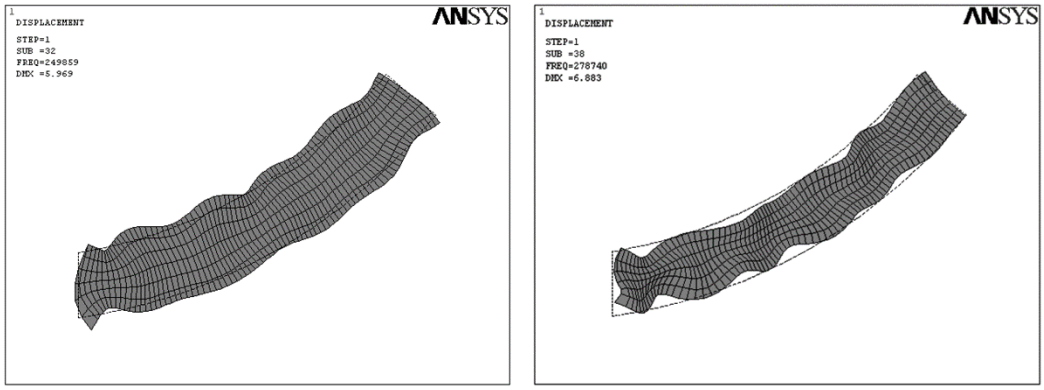
Рис. 1. Карты акустического давления в фокальной плоскости HIFU преобразователя на частотах возбуждения: 1.61 МГц (*а*) и 1.64 МГц (*б*)

Из рисунка 1 видно, что изменения частоты возбуждения HIFU преобразователя в интервале между резонансной и антирезонансной частотами сферического фокусирующего пьезоэлемента приводят к изменению формы и уровня боковых лепестков основного максимума. Эти изменения вызваны изменениями мод собственных колебаний сферического фокусирующего элемента (волны Лэмба) на разных частотах.

Это предположение подтверждается конечно-элементными (FEM) расчетами мод собственных колебаний сферического фокусирующего элемента на частотах электрического резонанса (рис. 2, *а*) и антирезонанса (рис. 2, *б*) [12, 13].

Абсолютное значение акустического давления, измеренного для HIFU преобразователей с

полипропиленовыми и полиэтиленовыми мембранами, незначительно отличается из-за акустического затухания в материале [15].



(*а*) (*б*)

Рис. 2. Моды собственных колебаний сферического фокусирующего элемента, полученные в результате конечно-элементного (FEM) моделирования с использованием программного пакета ANSYS [14], на частотах электрического резонанса (*а*) и антирезонанса (*б*)

Заключение

В данной работе экспериментально исследованы акустические поля сферически фокусирующих HIFU преобразователей, изготовленные из пористой пьезоэлектрической керамики системы ЦТС. Полученные экспериментальные результаты сопоставлены с результатами (FEM) конечно-элементного моделирования профилей собственных колебаний пористых пьезоэлементов на резонансных и антирезонансных частотах.

Показано, что любые неоднородности формы и размеров фокусирующего пьезокерамического элемента, флуктуации рабочей частоты, а также конструктивные особенности преобразователей (корпус, мембрана и т.д.) существенно влияют на параметры акустического поля (давление, уровень боковых лепестков и т.д.). Эксперименты ex vivo на биологических тканях и акустических фантомах подтвердили результаты измерений и расчетов.

Отмечено, что пористые фокусирующие элементы по аналогии с композитами 1-3 связности обладают низким акустическим сопротивлением, высокой электромеханической активностью и низкими паразитными колебаниями, что обеспечивает низкий уровень боковых лепестков и высокую акустическую эффективность преобразователей.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-72-10128, https://rscf.ru/project/24-72-10128/ в Южном федеральном университете.

Список литературы

1. *Rybyanets A.N.* Recent Advances in Medical Ultrasound // In "Piezoelectrics and Related Materials: Investigations and Applications". Nova Science Publishers Inc., NY, 2012. P. 143.

2. *Хилл К., Бэмбер Дж., Хаар Г.* Ультразвук в медицине. Физические основы применения. Пер.с англ. Изд. 2, перераб., доп. Физматлит. М., 2008. 544 с.

3. *Turner B., Cranston D.* A Review of High-Intensity Focused Ultrasound // Int. J. Transl. Med. 2024. **4**. P. 197.

4. *Nartov F.A., Williams R.P., Khokhlova V.A.* Electronic focus steering capabilities of a diagnostic-type linear ultrasound array designed for high power therapy and its visualization // Acoust. Phys. 2023. **70**, N 1. P. 165.

5. *Швецова Н.А., Макарьев Д.И., Швецов И.А., Щербинин С.А., Рыбянец А.Н*. Новые методы и конструкции фокусирующих пьезопреобразователей для ультразвуковой диагностики и терапии // Известия РАН. Серия физическая. 2018. **82**, № 3. С. 293.

6. *Rybyanets A.N., Naumenko A.A., Sapozhnikov O.A., Khokhlova V.A.* New method and transducer designs for ultrasonic diagnostics and therapy // Physics procedia. 2015. **70**. P. 1152.

7. *Хохлова В.А., Пономарев А.Е., Аверкью М.А., Крам Л.А.* Нелинейные импульсные поля прямоугольных фокусированных источников диагностического ультразвука // Акустический журнал. 2006. **52**, № 4. С. 560.

8. *Shvetsov I.A., Shvetsova N.A., Reznitchenko A.N., Rybyanets A.N.* New Methods of Complex Therapeutic Treatment and Accelerated Regeneration of Superficial Tissues of a Patient // In "Advanced Materials - Techniques, Physics, Mechanics and Applications". Springer Proceedings in Physics. NY, 2017. P. 489.

9. *Rybyanets A.N.* Ceramic piezocomposites: modeling, technology, and characterization // In "Piezoceramic Materials and Devices". Nova Science Publishers Inc., NY, 2010. P. 113.

10. *Shvetsov I.A., Petrova E.I., Lugovaya M.A., Shvetsova N.A., Scherbinin S.A., Rybyanets A.N.* Ferroelectrically Hard Porous Ceramics: Fabrication, Properties and Ultrasonic Transducer Applications // In "Advanced Materials". Springer Proceedings in Physics, NY, 2018. P. 33.

11. Precision Acoustics Ltd. (www.acoustics.co.uk).

12. *Rybyanets A.N., Nasedkin A.V., Naumenko A.A., Shvetsova N.A., Lugovaya M.A., Petrova E.I.* Optimization of Finite Element Models for Porous Ceramic Piezoelements by Piezoelectric Resonance Analysis Method // In "Advanced Materials - Studies and Applications". Nova Science Publishers Inc., NY, 2015. P. 147.

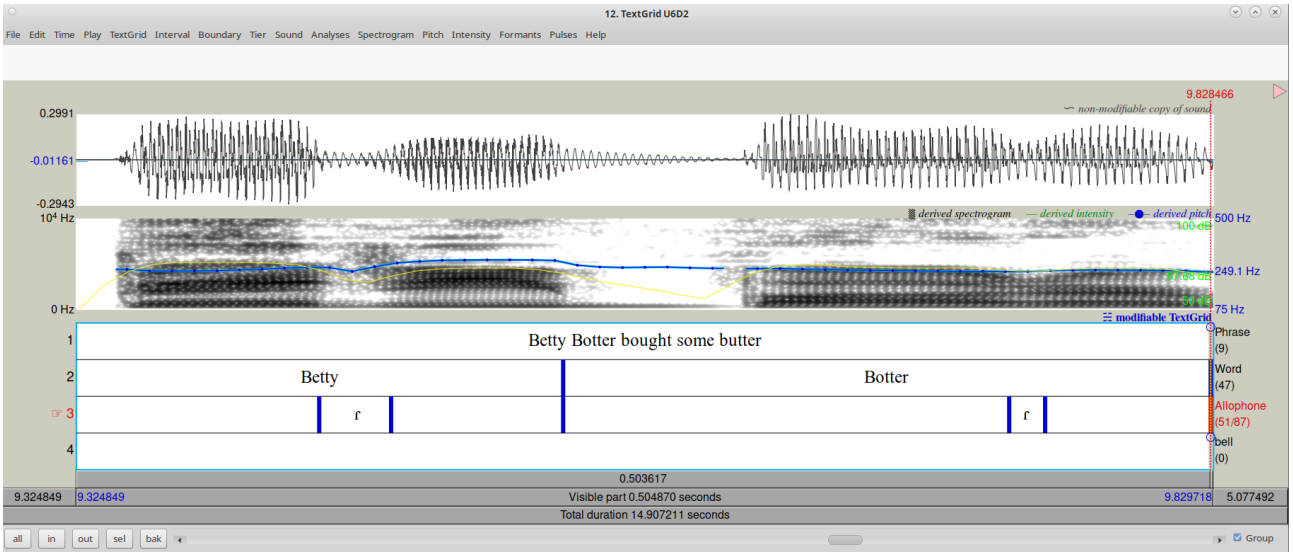
13. *Швецов И.А., Щербинин С.А., Астафьев П.А., Мойса М.О., Рыбянец А.Н*. Численное моделирование и оптимизация акустических полей и конструкций фокусирующих ультразвуковых преобразователей высокой интенсивности // Известия РАН. Серия физическая. 2018. **82**, № 3. С. 405.

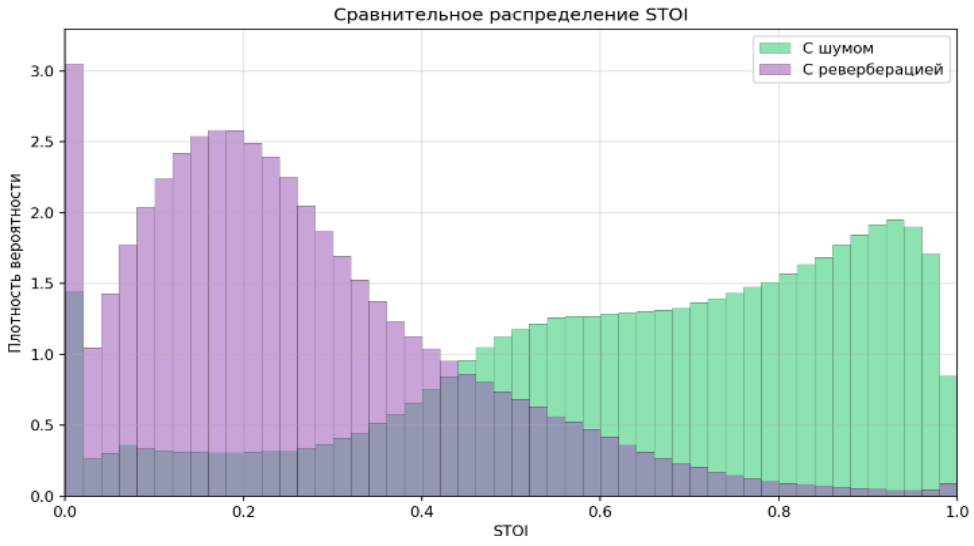
14. ANSYS (https://www.ansys.com/)

15. *Pardo L., Alemany C., Ricote J., et al.* Iterative methods for the characterization of piezoelectric materials with losses // Proc. Intern. Conf. Material Technology and Design of Integrated Piezoelectric Devices. 2004. P. 145.

Назад к содержанию секции

АКУСТИКА РЕЧИ, АКУСТИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЛИНГВИСТИКИ





назад к Содержанию

СОДЕРЖАНИЕ СЕКЦИИ АКУСТИКА РЕЧИ И АКУСТИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЛИНГВИСТИКИ

1. АКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕЧИ, КАК БИОМАРКЕРЫ ЗАБОЛЕВАНИЙ
Ляксо Е.Е. 1253

2. АКУСТИЧЕСКИЕ И ПЕРЦЕПТИВНО-СЛУХОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ РЕЧЕВОГО И ПСИХОЛОГИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ
Потапова Р.К., Потапов В.В., Курьянова И.В., Сапунова П.В. 1262

3. НЕЙРОСЕТЕВОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЗИЦИОННО-ОБУСЛОВЛЕННЫХ ПРОИЗНОСИТЕЛЬНЫХ ОШИБОК В РУССКОЙ РЕЧИ ИНОСТРАНЦЕВ
Кедрова Г.Е., Чучупал В.Я., Проничева А.Ю. 1270

4. КРИТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ БАЗОВЫХ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ ГЛАСНЫХ
Морозова О.Н., Уртегешев Н.С. 1276

5. АКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОДНОУДАРНЫХ АЛЛОФОНОВ В АНГЛИЙСКОЙ РЕЧИ РУССКИХ СТУДЕНТОВ И АМЕРИКАНЦЕВ
Андросова Е.Е., Андросова П.Е., Андросова С.В. 1282

6. МУЛЬТИМОДАЛЬНОЕ РАСПОЗНАВАНИЯ ЭМОЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ЧЕЛОВЕКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАЛЫХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ
Цыгляев В.М., Коротеева О.В. 1289

7. АКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРИНСКОЙ РЕЧИ, ОБРАЩЕННОЙ К ДЕТЯМ-БЛИЗНЕЦАМ
Куражова А.В. 1295

8. АКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭМОЦИОНАЛЬНОЙ РЕЧИ МАЛЬЧИКОВ 12-16 ЛЕТ С ТИПИЧНЫМ РАЗВИТИЕМ, РАССТРОЙСТВАМИ АУТИСТИЧЕСКОГО СПЕКТРА И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫМИ НАРУШЕНИЯМИ СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ
Клешнев Е.А., Ляксо Е.Е. 1300

9. АКУСТИЧЕСКИЕ И ПЕРЦЕПТИВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕЧИ ДЕТЕЙ С СИНДРОМОМ ДЕФИЦИТА ВНИМАНИЯ И РАССТРОЙСТВАМИ АУТИСТИЧЕСКОГО СПЕКТРА СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ
Ляксо Е.Е., Фролова О.В. 1306

10. ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕЧИ ДЕТЕЙ С СИНДРОМОМ ДЕФИЦИТА ВНИМАНИЯ И ГИПЕРАКТИВНОСТИ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫМИ НАРУШЕНИЯМИ
Фролова О.В., Ляксо Е.Е. 1312

11. РЕЧЕВОЕ ПОВЕДЕНИЕ ШКОЛЬНИКОВ 6-9 КЛАССОВ СО СЛУХОРЕЧЕВЫМИ НАРУШЕНИЯМИ В ПРОЦЕССЕ ДИАЛОГИЧЕСКОГО ОБЩЕНИЯ С ПЕДАГОГОМ-ДЕФЕКТОЛОГОМ
Столярова Э.И., Белова Н.Ю., Солнушкин С.Д., Чихман В.Н. 1318

12. МЕТОДОЛОГИЯ АНАЛИЗА МЕЛОДИЧЕСКОГО КОМПОНЕНТА ОФОРМЛЕННОСТИ ВЫСКАЗЫВАНИЯ (КОРПУСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НА МАТЕРИАЛЕ РУССКОГО ЯЗЫКА)
Караваева В.Г. 1326

13. СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ РАЗБОРЧИВОСТИ РЕЧИ
Столбов М.Б., Давыдов Д.А., Кабаров В.И. 1331

14. ТОПОЛОГИЯ РЕАЛИЗАЦИИ СУБЪЕКТИВНОГО ЗВУКОВОГО ПОЛЯ
Потапова Р.К., Потапов В.В., Померанцев Н.Д.....1337

15. ОТРАЖЕНИЕ ЭМОЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ В ХАРАКТЕРИСТИКАХ РЕЧИ ДЕТЕЙ 5-7 ЛЕТ СО СМЕШАННЫМИ СПЕЦИФИЧЕСКИМИ РАССТРОЙСТВАМИ ПСИХОЛОГИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ
Граве П.И, Николаев А.С. 1338

16. ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОГЛОТТОГРАММЫ ЖЕНЩИН С ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ НАРУШЕНИЯМИ РАБОТЫ ГОЛОСОВЫХ СКЛАДОК
Ильяс А., Фролова О.В. 1344

17. ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭМОЦИОНАЛЬНОЙ РЕЧИ ДЕТЕЙ С СИНДРОМОМ ДАУНА В ВОЗРАСТЕ 8-11 ЛЕТ
Турченко П.С., Ляксо Е.Е.....1350

УДК 534.784; 612.85 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39692

Акустические характеристики речи как биомаркеры заболеваний

Е.Е Ляксо[1]

[1] *Санкт-Петербургский государственный университет, Биологический факультет, кафедра ВНД и психофизиологии, группа по изучению детской речи, Санкт-Петербург, 199034, Университетская наб. 7-9*
e-mail: lyakso@gmail.com, e.lyakso@spbu.ru

Аннотация: Представлен анализ данных об отражении психоневрологического статуса и эмоциональных состояний в характеристиках голоса и речи – от ранних вокализаций младенцев до речи детей и подростков. Созданы базы данных, содержащие вокализации и речь детей от рождения до 3 лет – «INFANT.RU» (187 детей); спонтанную «Child.RU» (150 детей) и эмоциональную речь «EmoCHildRu» (124 ребенка) детей 4-7 лет. Анализ материала позволил получить нормативные данные о речевом развитии детей, служащие контролем при анализе характеристик речи детей с атипичным развитием. База «AD_Child.RU» содержит речевой материал 265 детей с атипичным и 127 типично развивающихся (ТР) детей в возрасте 4-16 лет, база «CEDM» – эмоциональную речь (n = 500). Особое внимание уделено речи детей с расстройствами аутистического спектра, синдромом Дауна, интеллектуальными нарушениями, синдромом дефицита внимания и гиперактивностью. Осуществлен перцептивный, спектрографический и автоматический анализ речи и определены специфические для диагноза характеристики. Отмечено, что в качестве маркеров, которые могут служить дополнительным диагностическим критерием заболевания, следует рассматривать совокупность акустических характеристик голоса и речи. В докладе обсуждаются перспективы исследования и использование методов искусственного интеллекта для разработки приложений для ранней диагностики в помощь врачу.

Ключевые слова: акустические характеристики речи, перцептивный эксперимент, речь, дети с атипичным развитием, акустические маркеры заболевания

PACS: 43.70.+i; 43.71.+m

Acoustic features of speech as biomarkers of disease

E.E. Lyakso[1]

[1]*Child speech research group, Department of Higher nervous activity and Psychophysiology, Biology Faculty, Saint-Petersburg state university, Saint Petersburg, 1999034, Russia*
e-mail: lyakso@gmail.com

Abstract: The paper presents an analysis of data on the reflection of psychoneurological and

emotional states in the voice and speech features – from early vocalizations of infants to the speech of children and adolescents. Databases «INFANT.RU» (187 children) containing vocalizations and speech of children from birth to 3 years), «Child.RU» - spontaneous speech (150 children) and «EmoCHildRu» - emotional speech (124 children) of children aged 4-7 years were created. The analysis of the material allowed us to obtain normative data on the speech development of children, which serve as a control for the speech characteristics of children with atypical development. The «AD_Child.RU» database contains the speech of 265 children with atypical and 127 typically developing (TD) children aged 4-16 years, the "CEDM" database includes the emotional speech of 500 children. Particular attention is paid to the speech of children with autism spectrum disorders, Down syndrome, intellectual disabilities, attention deficit hyperactivity disorder. Perceptual, spectrographic, and automated speech analysis was conducted. It is noted that the set of acoustic features of voice and speech should be considered as markers that can serve as additional diagnostic criteria for the disease. The paper discusses research prospects and the use of artificial intelligence methods to develop early diagnostic applications to assist medical doctors.

Keywords: acoustic features of speech, perceptual experiment, speech, children with atypical development, acoustic markers of disease

PACS: 43.70.+i; 43.71.+m

1 Введение

К вопросу о возможности диагностики состояний человека по голосу и речи обращались давно. Выбор речи в качестве индикатора состояния обусловлен сложностью и многоуровневостью ее организации и множественностью выполняемых функций. В медицинской литературе отмечаются голосовые и речевые особенности детей и взрослых с разными заболеваниями и психоневрологическими нарушениями. Уже по первому крику новорожденного можно судить о его здоровье [1]. Одно из первых систематических исследований детских вокализаций связано с именем скандинавского исследователя О. Ваз-Хокерта, изучавшего на основе спектрографического анализа информационные возможности плача новорожденных [2]. Первые результаты были получены при сравнении плача здоровых детей и детей с синдромом Дауна. Позднее было выявлено отличие разных типов плача по акустической структуре и описаны особенности плачей при кардиореспираторных заболеваниях и неврологических нарушениях детей первого месяца жизни [3]. Более поздний этап исследований связан с анализом акустических характеристик речи детей с психоневрологическими нарушениями. Начиная с пионерской работы Л. Каннера [4], описывающей речь детей с расстройствами аутистического спектра (РАС), много исследований посвящено описанию акустических характеристик речи детей с РАС [например

5, 6], детей с синдромом Дауна (СД) [7, 8], интеллектуальными нарушениями (ИН) [9]. Несмотря на некоторую противоречивость данных, эти исследования положили начало поиску акустических маркеров заболеваний и возможности использовать выявленные признаки в автоматическом анализе речи [10].

Наши исследования проведены с целью выявления акустических характеристик речи детей, которые можно рассматривать в качестве маркеров заболевания.

Рассматриваемые вопросы:

1. Создание речевых баз данных как необходимое условие для получения валидной выборки данных.
2. Методы анализа речи. Обоснование выбора акустических характеристик речи.
3. Норма – атипичное развитие: подбор речевого материала детей, служащего контролем для речи детей с атипичным развитием и/или нарушениями развития.
4. Перспективы использования речевых маркеров в медицинской практике.

2 Основная часть

Исследования в области акустики детской речи, вне зависимости от целей исследования, требуют наличия достаточной выборки информантов, стандартизации условий набора материала, использование объективных инструментальных методов анализа. Одним из основных условий является наличие речевых баз данных, включающих информацию об условиях и ситуациях записи, характеристиках звукозаписывающей аппаратуры.

Речевые базы (1): Сотрудниками Группы по изучению детской речи СПбГУ (руководитель – д.б.н. Е.Е. Ляксо) созданы базы данных, содержащие вокализации и речь детей от рождения до 3 лет – «INFANT.RU» (187 детей, 70 часов записи); спонтанную «CHILD.RU» (150 детей – 20 часов) и эмоциональную «EmoCHildRu» речь (124 ребенка) детей 4-7 лет [10]. Все речевые файлы представлены в формате Windows PCM. Для работы с базой «INFANT.RU» создана программа VDB.EXE. База «CHILD.RU» включает речевой материал детей, уже имеющих записи в базе «INFANT.RU», и записи речи детей с четырехлетнего возраста, отсутствующих в первой базе. Каждая запись сопровождается подробным протоколом и/или параллельной записью поведения детей на видеокамеру. В базе содержится информация о детях, семье, условиях записи. Речевой материал сопровождается текстовыми файлами, в которых приведено орфографическое описание диалогов между взрослым и ребенком, отдельных детских фраз и слов. Речевой материал в базе «CHILD.RU» представлен в виде оригинальных файлов длительностью до 5 минут, соответствующих ситуациям: спонтанная речь, чтение, ответы на вопросы, стихи и рассказ, счет и алфавит, игра. Программа позволяет осуществлять поиск информации в базе по всем признакам: информация

о ребенке (пол, возраст, наличие-отсутствие заболеваний и т.п.), матери и условиях записи (рис.1).

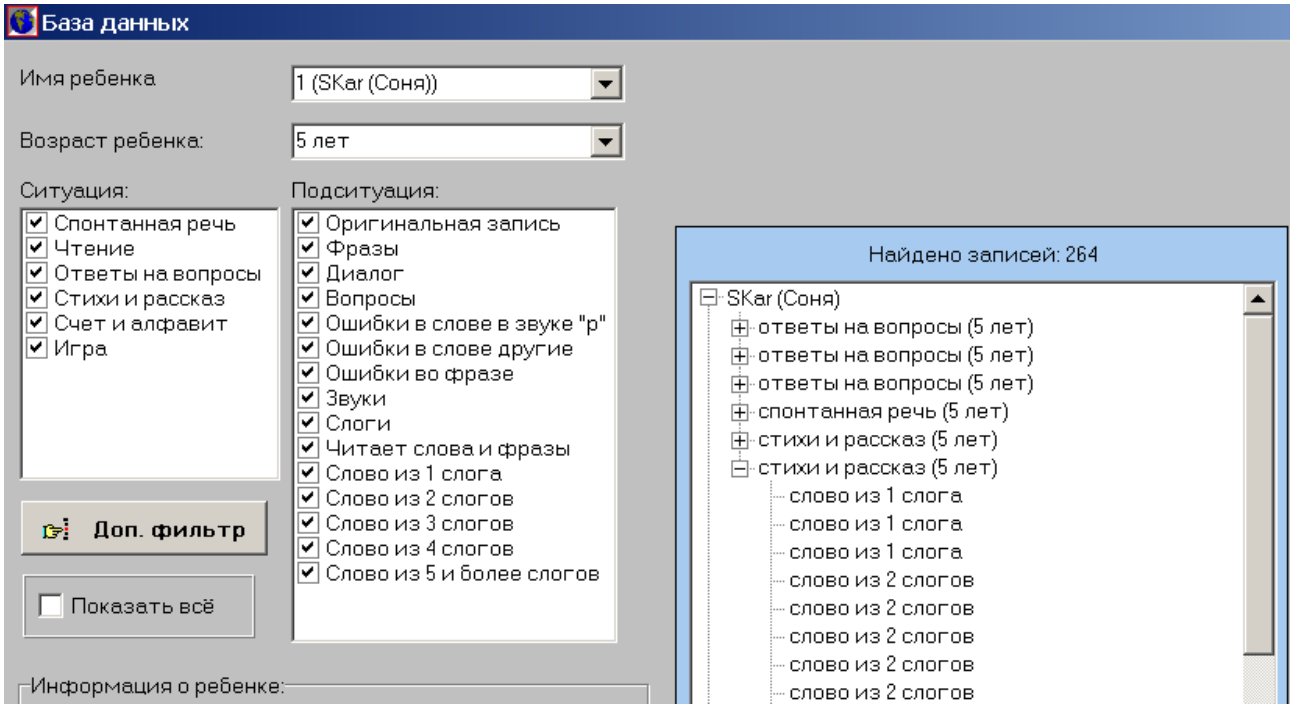


Рисунок 1. Рабочее окно программы базы «CHILD.RU»

База данных «EmoChildRu» содержит спонтанную эмоциональную речь детей 4-7 лет. Общий размер базы данных составляет 116 Гб. Программный комплекс включает в себя компонент оболочки базы данных и сам корпус. База данных хранит информации о файлах и их связях, определяющих соответствие файлов. Оболочка базы данных предоставляет пользователю возможности по навигации, просмотру и поиску информации в базе.

Анализ речевого материала, содержащегося в базах данных, позволил получить данные о речевом онтогенезе, проследить динамику акустических характеристик речи типично развивающихся (ТР) детей, и перейти к изучению речевого дизонтогенеза. С этой целью создана база «AD-Child.Ru», содержащая речь и видеозаписи детей с атипичным развитием [11]. База содержит речевой материал 265 детей с РАС, СД, ИН, детским церебральным параличом и легкими неврологическими нарушениями. В отличие от предыдущих баз, речевой материал каждого ребенка представлен длинными оригинальными, которые могут содержать речь родителей и экспериментатора, по 20-40 минут, и записями модельных ситуаций (игра, рассказ по картинке, диалог с экспериментатором и т.д.) по 5-15 минут. Файлы содержат фонематическое описание речи детей. Для части речевого материала проведено фонетическое описание посредством международного фонетического алфавита (МФА) и САМПА для русского языка. Речевой материал сопровождается информацией о психофизиологическом и психоневрологическом состоянии ребенка, включает результаты

тестов и опросников. База данных состоит из совокупности бинарных файлов и базы данных под управлением СУБД Microsoft SQL Server Compact 4.0. Язык программирования – C#.

Запись речевого материала мы проводим на профессиональную аппаратуру – цифровые магнитофоны «Marantz PMD222» и «Marantz PMD660» с выносным микрофоном «SENNHEIZER e835S», поведение детей записываем на видео камеру – «SONY HDR-CX560E». Запись осуществляется в условиях лаборатории, детских садов, школ, специализированных и медицинских центров. Условия записи – максимальное соотношение сигнал/шум.

Методы анализа речи (2): В работе используем перцептивный эксперимент, инструментальный анализ в звуковом редакторе «Cool Edit Pro 2.0», фонетический анализ с использование МФА и САМПА для русского языка, лингвистический анализ речи. Лингвистический анализ включает определение частотности частей речи, сложности реплик. При аннотировании речевого материала по категориям эмоций используем параллельный анализ видеозаписей, служащий контролем ситуации и изучаемой эмоции.

Обоснование выбора акустических характеристик: Анализ речи включает определение значений частоты основного тона (ЧОТ, F0), трех первых формант (F1, F2, F3) – на стационарном участке гласного, длительности слов и ударных гласных в словах. Считаем вариативность ЧОТ [F0max-F0min], индекс артикуляции гласных (ИАГ) в словах и разность между двумя первыми формантами [F2-F1]. Анализируемые акустические характеристики отражают основные физиологические процессы, протекающие в речевом тракте при голосо- и речеобразовании. Временные характеристики отражают процессы формирования речевого дыхания, значения ЧОТ – частоту колебания голосовых складок, значения двух первых формант – процессы, проходящие в ротовой полости. Значения двух первых формант гласных являются акустическими ключами для идентификации гласных, диапазон F1, F2 - характеристика F-картины гласных, которая определяется фонемной принадлежностью и фонетическим качеством гласного, индивидуальными особенностями говорящего и анатомическими размерами речевого тракта. Третья форманта имеет значение для определения качества голоса и различения его тонких нюансов. F3 наиболее чувствительна к положению кончика языка, округлению губ и форме переднего отдела голосового тракта, представляя более подробную информацию о форме голосового тракта в процессе артикуляции. ИАГ отражает четкость произнесения гласных в словах.

Автоматический анализ проводим с целью классификации речи, как принадлежащей ребенку с типичным развитием или с атипичным развитием, для определения пола, возраста, эмоционального состояния, морфологического состава текста. Для автоматического анализа требуется большой массив речевого материала, содержащегося в речевых базах.

Норма – атипичное развитие (3): Анализ плачей младенцев первого месяца жизни показал, что по значениям ЧОТ и по нарушению гармонический структуры спектра (шумовые фрагменты, отражающие специфику работы голосовых складок) можно судить о нарушении состояния ребенка, что подтверждено заключением неонатолога.

Проведено несколько исследований с целью определения акустических характеристик речи детей, специфичных для РАС. Выбор анализируемых характеристик был обоснован данными, полученные разными исследовательскими коллективами, и предварительными результатами собственных исследований. В исследовании использован речевой материал ТР детей, детей с РАС (дети с РАС разделены на две группы - РАС-1 – дети с РАС с регрессом в развитии в возрасте 1,5-3,0 года; РАС-2 - дети с риском развития диагностированным при рождении и аутистической симптоматикой, вызванной нарушениями ЦНС).

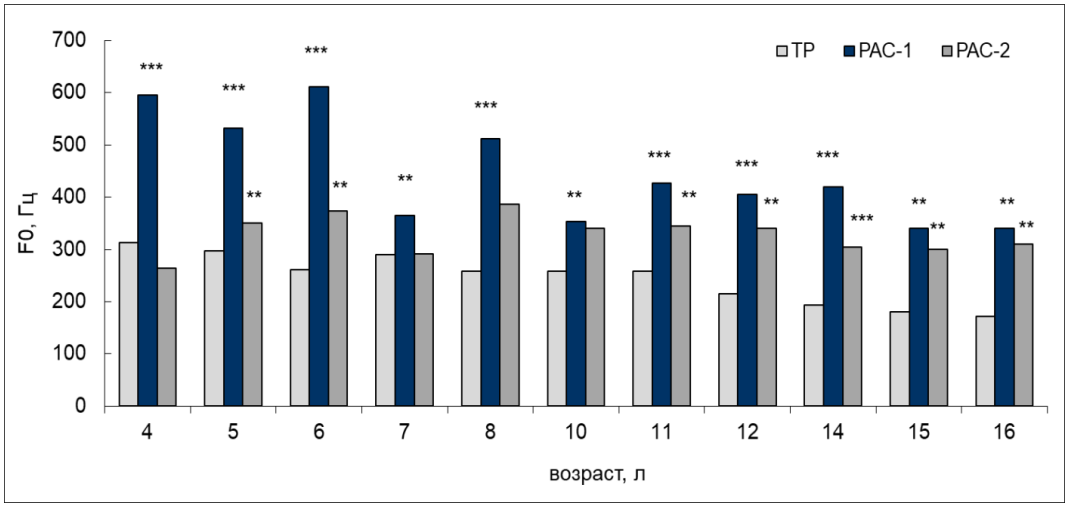


Рисунок 2. Значения частоты основного тона ударных гласных в словах ТР детей, детей с РАС -1 и РАС-2.
*** p<0.001; ** p<0.01 – Манна-Уитни (p<0.05)

Для речи детей с РАС выявлены: высокие значения ЧОТ (рис. 2); вариативность ЧОТ; высокие значения третьей форманты и амплитуды третьей форманты, нормированной по отношению к амплитуде частоты основного тона, обуславливающие атипичную спектрограмму речевого сигнала за счет выраженных высокочастотных составляющих; высокие значения индекса артикуляции гласных, свидетельствующие о возможности четкого произнесения гласных [13].

Способность детей с РАС к четкому произнесению гласных в словах легла в основу разработки модели «повторение слов». Модель «повторения слов» может быть использована для оценки динамики формирования артикуляционных навыков ребенка в процессе обучения. Она позволяет оценить: формирование четкости артикуляции звуков; развитие вербальной памяти – сохранение образа слова; развитие слуховой памяти – вычленение из речевого потока и воспроизведение интонации; формирование внимания ребенка. В перцептивном

эксперименте слушатели с большей вероятностью определяли значение слов, повторяемых детьми с РАС, чем слов спонтанной речи.

Для определения специфичности для РАС выявленных акустических признаков, проведен акустический анализ речи детей с СД и детей с ИН. Дети с ИН разделены на две подгруппы по степени тяжести заболевания F83 - легкая степень, F70 – средняя. Показано, что значения ЧОТ в речи детей с РАС значимо выше, чем у детей ТР и ИН (F70), минимальные значения ЧОТ в речи детей с СД. Выявлены специфические характеристики речи детей с разными диагнозами. Подтверждены ранее полученные данные об акустических характеристиках речи детей с РАС и добавлены данные фонетического анализа, указывающие на несформированность согласных звуков. Для речи детей с СД характерна максимальная длительность гласных в слова; минимальные значения ИАГ. Для некоторых детей (35-40%) – наличие пауз между слогами в слове вследствие дополнительного вдоха; низкие значения третьей форманты; несформированность согласных звуков. Для речи детей с ИН (F70): низкие значения индекса артикуляции гласных в словах; высокие значения ЧОТ; высокие значения третьей форманты. Для речи детей с ИН (F83) характерны низкие значения ЧОТ; высокие значения ИАГ и третьей форманты. Таким образом, выявленные акустические характеристики речи в совокупности могут служить маркерами заболеваний [14].

Дальнейшее исследование направлено на выявление речевых маркеров СДВГ. В пилотных исследованиях показано, что по значениям ЧОТ дети с СДВГ не отличаются от ТР детей, значимые различия связаны с артикуляционными характеристиками [15].

Автоматическая классификация психоневрологического статуса по речи детей показала, что СД определяется с точность. 0,82; РАС – 0,70, типичное развитие – 0,83. По речевым фрагментам возраст с большей точностью определятся для детей с РАС и детей с СД по сравнению с ТР детьми.

Одним их направлений наших исследований явилось изучение отражения эмоциональных состояний в характеристиках голоса и речи. С этой целью разработан методический подход Child Emotional Development Method (CEDM) для оценки сформированности эмоциональной сферы детей в возрасте 5-16 лет с типичным и атипичным развитием, учитывающий психоневрологический статус детей, их возраст, условия воспитания и языковую и культурную принадлежность. Создана база данных «CEDM» эмоциональной речи и мимики 447 детей. Общее время записей 447 х 60-120 мин. Данные из базы данных использованы в перцептивных исследованиях и автоматической классификации. С использованием разных подходов получены новые данные о возможности автоматического распознавания эмоций ТР детей, детей с РАС, ИН, СД по их речи и мимике. Выявлены преимущества и недостатки используемых классификаторов в зависимости от типа эмоции и

психоневрологического статуса ребенка. Разработана модель для мультимодального распознавания эмоций детей. Ее применение для классификации эмоций детей с РАС и ИН показало улучшение результата по сравнению с мономодальным распознаванием и увеличение точности распознавания по сравнению с базовой моделью.

3 Заключение

Перспективы использования речевых маркеров в медицинской практике (4):. Исследование положило начало научному определению биомаркеров заболеваний по характеристикам голоса. Результаты исследования могут быть положены в основу разработки автоматических систем распознавания состояния ребенка (психоневрологического и эмоционального) по характеристикам его голоса (рис. 3).

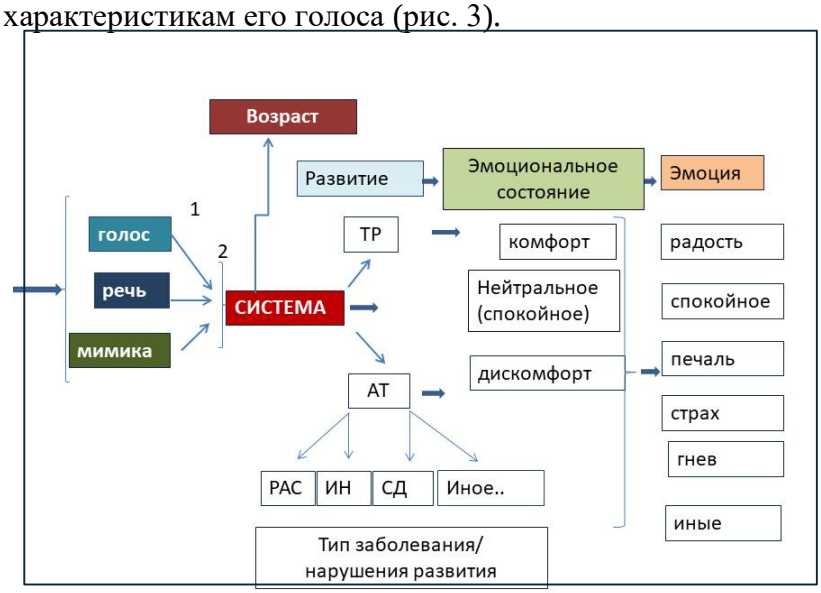


Рисунок 3. Схема автоматического распознавания эмоциональных состояний детей по характеристикам голоса, речи и мимической экспрессии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (проект № 25-15-00139).

Список литературы

1. *Тур А.Ф.* Пропедевтика детских болезней. Медгиз. М., 1955.
2. *Wasz-Hockert O., Partanen T., Vuorenkoski E., Michelson K.* The identification of some specific meaning in infant vocalizations. // Experientia. 1964. 20. P. 154.
3. *Michelsson K.* Why babies cry? // Nordic Medicin. 1995. **110,** N 11. P. 271.
4. *Kanner L.* Autistic disturbances of affective contact. // Nervous Child. 1943. N. 2. P. 217.
5. *Bonneh, Y.S., Levanov, Y., Dean-Pardo, O., Lossos, L., Adini, Y.* Abnormal speech spectrum and increased pitch variability in young autistic children. // Frontiers in Human Neuroscience. 2011. **4.** 237.

6. *Lyakso E., Frolova O., Grigorev A.* Perception and acoustic features of speech of children with autism spectrum disorders. // LNAI. 2017. **10458**. P. 602.
7. *Vorperian H. K, Kent R. D, Lee Y, Buhr K. A.* Vowel production in children and adults with Down syndrome: fundamental and formant frequencies of the corner vowels. // J Speech Lang Hear Res. 2023. **66,** N 4. P. 1208.
8. *Carl M., Icht M.* Perceptual and acoustic predictors of speech intelligibility among Hebrew-speaking young adults with Down syndrome. // J of Com. Disord. 2025. 115. 106529.
9. *Smith E, Sumner P., Hedge C., Powell G.* Smart speaker devices can improve speech intelligibility in adults with intellectual disability. // Int J Lang Commun Disord. 2021. **56**, N 3. P. 583.
10. *Matveev Y., Matveev A., Frolova O., Lyakso E.* Automatic Recognition of the Psychoneurological State of Children: Autism Spectrum Disorders, Down Syndrome, Typical Development. // LNAI. 2021. **12997**. P. 417.
11. *Лаксо Е.Е., Фролова О.В., Григорьев АС., Остроухов А.В*. Корпуса детской речи «INFANT.RU», «CHILD.RU», «EmoChildRu» на материале русского языка и использование в исследованиях речевого онтогенеза. // Теоретическая и прикладная лингвистика. 2017. **3**. № 1. С. 28.
12. *Lyakso E., Frolova O., Kaliyev A., Gorodnyi V., Grigorev A., Matveev Y.* AD-Child.Ru: Speech Corpus for Russian Children with Atypical Development. // LNAI. 2019.**11658**. P. 299.
13. *Lyakso E., Frolova O., Grigorev A.* A Comparison of Acoustic Features of Speech of Typically Developing Children and Children with Autism Spectrum Disorders. // LNAI. 2016. **9811**. P. 43.
14. *Lyakso E., Frolova O., Nikolaev A.* Voice and speech features as diagnostic symptom. // Psychological Applications and Trends 2021 / ed. C. Pracana, M. Wang / Science Press, Lisboa, Portugal, 2021. P. 259.
15. *Lyakso E., Frolova O., Lebedev A., Shabanov P., Grechanyi S., Atamanova E., Kovelenova M., Limarenko V.* Behavior and Speech Features of Children with ADHD. // Healthcare. 2026, **14**, N 814. P.1.

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39693

АКУСТИЧЕСКИЕ И ПЕРЦЕПТИВНО-СЛУХОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ РЕЧЕВОГО И ПСИХОЛОГИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Потапова Р.К.[1)], Потапов В.В.[2)], Курьянова И.В.[1)3)], Сапунова П.В.[3)]

[1)]ФГБОУ ВО МГЛУ, г. Москва, ул. Остоженка, 38;
[2)] ФГБОУ ВО МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Ленинские горы, ГСП-1;

[3)] ГБУ г. Москвы «Московский исследовательский центр» Департамента региональной безопасности и противодействия коррупции, г. Москва, ул. Тверская, 13

Тел.: (905 5237672); E-mail: (ivkuryanova@mail.ru)

Воздействие на человека посредством речи в условиях значительного видоизменения и расширения концепта «коммуникация» в эпоху глобальной цифровизации активно изучается в современной криминалистике, интенсифицировавшей в XXI веке средства и методы применения речевой акустики. Акустические и перцептивно-слуховые параметры позволяют определить объективные характеристики артикуляторной реализации речевого высказывания, главной целью которого является психологическое воздействие речи говорящего на слушающего. На прием, восприятие и интерпретацию речевой информации влияет совокупность не только собственно лингвистических (вербальных), но также пара-, экстравербальных (просодических, акустических) и психолингвистических факторов, поэтому при анализе речи в криминалистических целях исследуется не только сам текст как некая объективная лингвистическая данность, но и «стоящие за текстом» адресат и адресант сообщения, особенности речевой ситуации, контекст, просодические и акустические параметры высказывания. В зависимости от коммуникативной целеустановки адресанта (угроза, склонение, индуцирование, мошенничество и т.д.) говорящим используются различные средства и приемы речевого и психологического воздействия на слушающего, которые коррелируют с определенными акустическими и перцептивно-слуховыми параметрами на просодическом уровне. В статье представлены акустические данные, соответствующие некоторым целеустановкам с учетом оказываемого речевого и психологического воздействия на слушающего, полученные в ходе экспертных исследований голоса и звучащей речи.

Ключевые слова: акустика речи, психологическое воздействие, речевое воздействие, коммуникативная цель, просодические параметры

ACOUSTIC AND PERCEPTUAL-AUDITORY PARAMETERS OF SPEECH AND PSYCHOLOGICAL INFLUENCE

Potapova R.K.[1)], Potapov V.V.[2)], Kuryanova I.V.[1),3)], Sapunova P.V.[3)]

[1)] Moscow State Linguistic University, Moscow, st. Ostozhenka, 38
[2)] Lomonosov Moscow State University, Moscow, Leninsky Gory, GSP-1;

[3)] *Moscow State Budgetary Institution "Moscow Research Center" of the Department of Regional Security and Anti-Corruption, Moscow, st. Tverskaya, 13*
Tel.: (905 5237672); E-mail: (ivkuryanova@mail.ru)

The influence on a person through speech in the context of a significant modification and expansion of the concept of "communication" in the era of global digitalization is actively studied in modern forensics, which intensified the means and methods of using speech acoustics in the 21st century. Acoustic and perceptual-auditory parameters make it possible to determine the objective characteristics of the articulatory realization of a speech utterance, the main purpose of which is psychological influence of the speaker's speech on a listener. The reception, perception and interpretation of speech information is influenced by a combination of not only linguistic (verbal), but also para-, extraverbal (prosodic, acoustic) and psycholinguistic factors, therefore, when analyzing speech for forensic purposes, not only the text itself is investigated as a kind of objective linguistic entity, but also the addressee and sender of the message, features of the speech situation, context, prosodic and acoustic parameters of the utterance. Depending on the communicative target setting of the addressee (threat, declination, inducement, fraud, etc.), speakers use various means and techniques of speech and psychological influence on the listener, which correlate with certain acoustic and perceptual-auditory parameters at the prosodic level. The article presents acoustic data corresponding to some targets, taking into account the speech and psychological influence on the listener, obtained during expert studies of voice and sounding speech.

Keywords: speech acoustics, psychological influence, speech influence, communicative goal, prosodic parameters

Введение

Проблема общения и шире – коммуникации как мультиполярного концепта – рассмотрена в разных областях науки с различных сторон [1, 2, 3]. С точки зрения решения основополагающих задач криминалистики – идентификации, верификации и диагностики («портретирования» по Р.К. Потаповой) личности, в том числе по речевым «следам» преступной деятельности, – под коммуникацией понимается продукт речевой деятельности человека как субстрат, содержащий индивидуальную совокупность признаков, позволяющих на основе инструментального (акустического), перцептивно-слухового и психолого-лингвистического анализа проводить атрибуцию высказываний (идентификацию и верификацию говорящего), а также получать информацию о категориальных признаках субъекта (возраст, профессия, эмоциональное состояние индивидуума в процессе продуцирования речи, мотивация его речевого поведения и пр.) [4, 5].

С учетом регулятивной функции общения основной целью речевого взаимодействия является психологическое воздействие на человека, когда индуктор (суггестор) оказывает такое влияние на адресата (суггеренда), которое вызывает у слушающего изменение либо его поведения, либо его эмоционального состояния, либо свойств его личности [3].

Психологическое воздействие с помощью «речевого канала» активно изучается в настоящее время лингвокриминалистикой, широко использующей методы речевой акустики: «фонетико-фонологические составляющие могут с большой долей вероятности дать ответ на то, *кто* говорит, *что* говорит, *как* говорит, *кому* говорит, *с какой целью* говорит и *каким образом* реализуется речевое воздействие говорящего на слушающего» [6: 19].

1 Содержание понятий «речевое» и «психологическое воздействие»

В расширенном понимании *речевое воздействие* – это воздействие на субъекта коммуникации посредством речи с целью побудить его сознательно принять точку зрения другого коммуниканта, решение о каком-либо действии и т.д. [7]. *Психологическое воздействие* – это деятельность, направленная на изменение параметров психики (мотивов, целей, отношений, установок, потребностей) объекта воздействия [8], т.е. воздействие на психическую сферу субъекта – сознание, мысли, чувства, а также его поступки, деятельность [9, 10].

1.1 Приемы психологического воздействия посредством речи

Приёмы воздействия – это психологические, вербальные, невербальные и семиотические действия со стороны воздействующего субъекта, направленные на достижение его целей [11]. В настоящее время выработан соответствующий понятийный аппарат, касающийся психологического воздействия посредством речи, например, понятия скрытых трансакций и игр, сформулированные Э.Берном; типы манипуляторов, определенные Э.Шостром; предложенные Р.Чалдини способы манипуляции, основанные на использовании стереотипов мышления; описанные В.П.Шейновым приемы манипуляции, используемые при совершении мошеннических действий, и т.д. [11]. К наиболее часто выделяемым способам психологического воздействия посредством речи относят убеждение, внушение, побуждение и «заражение», также ряд авторов относит к приемам психологического воздействия принуждение и подражание [11]. Данные способы психологического воздействия включают разнообразные приёмы в зависимости от конкретной целеустановки индуктора (например, воздействие в форме принуждения может быть представлено угрозой, запугиванием, требованием и т.п.; внушение, как правило, строится на эмоциональном программировании – ободрение, похвала, порицание, насмешка, выражение недоумения и т.д.) [11]. Таким образом, проблема психологического воздействия при осуществлении коммуникативного процесса является достаточно разработанной в теоретическом плане, однако в прикладном аспекте с точки зрения определения объективных акустических параметров, подтверждающих либо опровергающих наличие определенной коммуникативной интенции с учетом психологического воздействия на реципиента данная проблема недостаточно изучена.

2 Корреляция коммуникативной направленности высказывания с просодическими параметрами речи

Эффективность речевого общения определяется достижением говорящим поставленной цели и во многом зависит от понимания адресатом закодированных в сообщении имплицитно или

эксплицитно выраженных целей высказывания [13]. Совокупность как собственно лингвистических (вербальных), так и пара-, экстравербальных (просодических, акустических) и психолингвистических факторов влияет на прием, восприятие и интерпретацию речевой информации. Скрытое коммуникативное намерение говорящего (умысел – в случае планирования и совершения преступления), легко поддающееся маскировке на лексико-семантическом уровне в содержании высказывания, могут быть декодированы посредством акустического анализа просодических параметров речи и соответствующих перцептивно-слуховых признаков.

Обязательным компонентом любой речевой единицы является просодия, определяемая как совокупность супрасегментных средств на двух уровнях: на уровне перцептивно-слухового восприятия (высота голоса, громкость, тембр) и на физическом (акустическом) уровне (частота основного тона (ЧОТ), длительность, интенсивность) [4]. Именно по просодическим характеристикам различаются вопрос, восклицание, побуждение, просьба, угроза и т.д. Просодия полифункциональна по своей природе, она не только соответствует содержанию высказывания, но и выполняет прагматическую функцию: посредством просодии выражается эмоционально-модальное отношение говорящего к сообщаемой информации, а также реализуется коммуникативная интенция адресанта с учетом оказываемого им речевого воздействия на слушающего [4, 5, 12].

Таким образом, ключом к правильной интерпретации цели высказывания с учетом оказываемого воздействия на слушающего является не только содержание высказывания (т.е. того, *что* произносит говорящий), но, главное, *как* и *где* (т.е. с помощью каких просодических средств и в какой речевой ситуации) он это произносит.

3 Акустические и перцептивно-слуховые параметры звучащей речи, соответствующие оказываемому воздействию посредством угрозы и внушения

Судебная практика по делам, связанным с расследованием особо тяжких преступлений, ставит на повестку дня вопрос об определении объективных признаков преступного воздействия на субъекта (это может быть вовлечение подростков в преступную деятельность – вербовка, склонение молодёжи к совершению теракта, побуждение к суициду, внушение определенного эмоционально-смыслового отношения к каким-либо объектам или явлениям). Как показывает экспертная практика по исследованию фонограмм, полученным в ходе оперативно-разыскных мероприятий, в данных категориях дел наиболее часто информация с учетом оказываемого психологического воздействия закодирована в целеустановках угрозы и внушения.

3.1 Угроза

Сложность функционирования угрозы определяется её комплексной целью – заставить подчиниться воле говорящего в ущерб собственным интересам. Часто в экспертной практике формальное выражение целеустановки «угроза» не соответствует реальному коммуникативному намерению говорящего и, напротив, формально прагматически

нейтральное высказывание содержит имплицитную угрозу, прямо не называемую говорящим с целью запугивания (неопределенность и неназванность внушает бóльший страх [13]). Реальные коммуникативные цели говорящих в таких случаях декодируются посредством перцептивно-слухового и акустического анализа высказываний. Проиллюстрируем вышесказанное примером.

Высказывание 1 (формальное отсутствие угрозы): «*Ты, главное, Смирягиной привет от меня передай! Ты-ы пойми! Я-я очень тебе хорошо, предлагаю подумать! Ты-ы подумай! Я тебе ещё раз предлагаю!*». Воздействие на слушающего посредством угрозы (запугивания) осуществляется на просодическом уровне. Исследованием по распределению просодических значений установлено, что значения ЧОТ при продуцировании угрозы значительно увеличивается (с 80 Гц до 120 Гц), при этом характерен широкий диапазон изменений значений ЧОТ (от 70 Гц до 250 Гц). В репликах этого типа фонация напряженная, характерен узкий раствор рта (на перцептивно-слуховом уровне воспринимается как говорение сквозь зубы), мелодический контур высказываний восходяще-ниходящий, ритмическое протекание речи с разрывами между словами, внезапными изменениями громкости (с преобладанием пониженной громкости) и тона голоса, акцентированы предъядерный и ядерный слоги, темп речи ниже среднего, с тенденцией к замедлению. Длительность звукового участка речи уменьшается по сравнению с значениями в прагматически нейтральных высказываниях, длительность пауз увеличивается («театральные» паузы).

Высказывание 2 (формальное выражение угрозы): «*Привет, мама! Как дела там на Взвозе? Я скоро приеду с канистрой бензина и зажигалочкой. Говоришь, никого не хочешь видеть, а сама находишься на Взвозе. Ну, хорошо, я приеду. Прямо сейчас с канистрой бензина, девяносто пятого. Всё, жди меня!*». Значения по распределению ЧОТ свидетельствуют о низком уровне и узком диапазоне изменений значений ЧОТ, громкость голоса выше среднего, паузы очень короткие, практически отсутствуют (фраза произносится «на одном дыхании»), темп речи стабильный, мелодика плавная, мелодический контур ровный и восходящий. Формальное продуцирование угрозы направлено в данном случае не на совершение конкретного действия-возмездия, а на инициацию негативных переживаний адресата. Перцептивно-слуховой и акустический анализ представленного речевого сигнала подтвердил подготовленность речи адресанта и наличие психологического процесса индуцирования говорящего со стороны третьего лица (оказания психологического воздействия, влияния на формирование позиции, отношения, предпочтений и др.).

Наиболее индикативные параметры, позволяющие выявить отличительные черты оказываемого психологического воздействия посредством угрозы, представлены следующим образом. Максимальные значения ЧОТ отмечаются в первых ударных слогах (предшкале синтагмы), заядерные слоги характеризуются минимальным значением ЧОТ, среднее значение ЧОТ для угрозы по сравнению с прагматически нейтральным высказыванием у

одного и того же диктора увеличивается на 20%. Скорость произнесения слогов при продуцировании угрозы составляет в среднем 330 слогов в минуту, что является показателем темпа ниже среднего. Значения интенсивности уменьшаются к завершению фонации. На динамическом уровне отмечается акцентуация громкостью ключевых слогов, что свидетельствует о повышении степени авторитарности всего высказывания. Число выделенных слогов в фразах-угрозах различается по количеству синтагм: в односинтагменных высказываниях в целом выделяется одно фразовое ударение, в двусинтагменных – появляется дополнительное синтагматическое ударение. Наблюдается тенденция к выделению первого элемента в высказывании (как правило, это выделение происходит за счет дополнительного ударения, паузы или более длительная артикуляция конечного гласного). Угроза на уровне просодии отличается от прагматически нейтральных высказываний в том, что смысломаркирующие слоги выделяются и на тональном, и на динамическом, и на темпоральном уровнях, что свидетельствует о категоричности содержания высказывания и безоговорочности исполнения требования (условия угрозы).

3.2 Внушение

Под внушением понимается такое воздействие на личность, которое приводит к неосознанному появлению у человека определенного отношения и поведения, которое не соответствует его реальным установкам, но выгодно и нужно суггестору [9, 11]. Выявление воздействия посредством внушения является более сложной процедурой по сравнению с распознаванием угрозы. Это связано прежде всего с тем, что для достижения желаемого воздействия посредством угрозы адресат должен осознанно изменить свои установки, поведение и т.д. для избежания последствий, сформулированных в угрозе, а эффективность воздействия в результате внушения зависит от степени неосознанности самого факта внушения у индуцируемого субъекта (чем меньше суггеренд понимает, что находится под воздействием, тем эффективнее внушение).

Наиболее индикативные параметры, позволяющие выявить отличительные черты оказываемого психологического воздействия посредством внушения, представлены следующим образом. Мелодический контур данных высказываний представляет собой практически прямую горизонтальную линию вплоть до ядерного слога и только на заядерном участке начинается подъем, который может плавно понижаться к концу высказывания, резкие перепады отсутствуют. Тем самым, для целеустановки «внушение» характерен плавный, восходящий (реже восходяще-нисходящий) к концу синтагмы контур мелодической кривой. Манера продуцирования речи с мягкими переходами, ритмическая, мелодическая, «эластичный» голос, характерны вкрадчивые интонации. Намеренно ровный тон при суггестировании адресата с бóльшей вероятностью позволяет достичь говорящему цели внушения. Диапазон изменений значений ЧОТ средний, повышается на ядерном участке (максимальный пик значения по сравнению с другими участками синтагмы). Показатель

средней скорости фонации при внушении равен 343 слогам в минуту, что является темпом произнесения ниже среднего. Увеличение длительности приходится на ключевые смысломаркирующие слоги (как правило при этом используется приём коммуникативного дублирования). Диапазон изменений интенсивности достаточно узкий, показатели громкости практически не изменяются вне зависимости от слоговой и фразовой акцентуации, за исключением предъядерного и заядерного участков синтагмы, где степень величины интенсивности незначительно повышается (в среднем на 5%), наибольшее значение интенсивности преобладает на участках предшкалы и шкалы синтагмы. Фразы-внушения представляют собой достаточно эмоциональные высказывания, темп которых практически не меняется на протяжении всей фонации.

В ходе проведения вышеописанного исследования установлено, что наиболее информативными для распознавания различных коммуникативных интенций являются значения ЧОТ и интенсивности, локализация в структуре синтагмы минимальных и максимальных показателей значений ЧОТ, диапазон изменений значений ЧОТ на разных участках синтагмы, направление мелодической кривой, а также средняя скорость артикуляции. Самыми индикативными параметрами преимущественно выступают значения ЧОТ и интенсивность. Выявление дифференциальных признаков на уровне длительности возможно при увеличении количества исследуемого материала.

Заключение

Речевая акустика как особое научное направление позволяет разработать ряд эффективных методов описания параметрических моделей звучащей речи, позволяющих на базе акустических и перцептивных параметров речевого сигнала решать основополагающие задачи современной криминалистики. С позиции криминалистики интерес представляет как фактическая вербальная информация, так и пара- и экстравербальная информация, зачастую, имеющая первостепенное значение. Исследование звучащей речи акустико-аудитивными методами, с учетом когнитивного анализа речевого материала, позволит, с нашей точки зрения, уточнить и расширить объективные характеристики, соотносящиеся с процессом распознавания и интерпретации доминирующих акустических и перцептивно-слуховых параметров речевого и психологического воздействия.

Список литературы

1. *Потапова Р.К.* Речь: коммуникация, информация, кибернетика: Учебное пособие. Изд. 4-е, доп.- М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2010. - 600 с.
2. *Потапова Р. К., Потапов В. В.* Речевая коммуникация: От звука к высказыванию. – М.: Языки славянских культур, 2012. - 464 с.

3. *Ильин Е.П.* Психология общения и межличностных отношений. – СПб.: Питер, 2010. – 570 с.
4. *Потапова Р. К., Потапов В. В.* Язык, речь, личность. – М.: Языки славянской культуры, 2006. – 496 с.
5. *Курьянова И.В.* Идентификационные характеристики иноязычного говорящего (экспертно-криминалистический аспект). Дисс. … канд. филол. наук: 10.02.21. М., 2019. - 220 с.
6. *Потапов В.В.* У истоков речеведения// Лингвистическая полифония. Сборник в честь юбилея профессора Р. К. Потаповой. - М.: Языки славянских культур, 2007. - С. 19-40.
7. *Стернин И.А.* Введение в речевое воздействие. Воронеж, 2001. – 252 с.
8. *Васкэ Е.В.* Психическое и психологическое воздействие в уголовном процессе - к определению понятий // Российский психологический журнал. 2010. Т. 7, N 1. С. 25-35.
9. *Кроз М.В., Ратинова Н.А., Онищенко О.Р.* Криминальное психологическое воздействие. М.: Юрлитинформ, 2008. – 198 с.
10. *Доценко Е.Л.* Психология манипуляции. М.,: ЧеРо, Издательство МГУ, 1997. – 344 с.
11. *Шелестюк Е.В.* Речевое воздействие: онтология и методология исследования. 2-е изд., испр. и доп. - М.: ФЛИНТА: Наука, 2014. - 344 с.
12. *Потапова Р.К., Потапов В.В., Лебедева Н.Н., Агибалова Т.В.* Междисциплинарность в исследовании речевой полиинформативности / Под ред. Р.К. Потаповой. – М.: Языки славянской культуры, 2015. – 352 с.
13. *Безяева М.Г.* Семантика коммуникативного уровня звучащего языка. М.: МГУ, 2002. - 752с.

УДК: 81-139. DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39694

Нейросетевое исследование позиционно-обусловленных произносительных ошибок в русской речи иностранцев

Г.Е. Кедрова[1,a], В.Я. Чучупал[2,b] Н.И. Миронова[3,c]

[1] *МГУ имени М.В. Ломоносова. Москва, Ленинские горы, д. 1.*

[2] *Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН. Москва, улица Вавилова, 44, корп. 2.*

[3] *МГУ имени М.В. Ломоносова. Москва, Ленинские горы, д. 1.*

E-mail: [a]gekedrova@yandex.ru , [b]v.chuchupal@gmail.com , [c]mironnat@rambler.ru

Аннотация: Произносительные ошибки, плохо осознаваемые изучающими иностранный язык, являются сегодня серьёзным препятствием для успешной межкультурной коммуникации. Актуальность этой проблемы возросла с распространением больших языковых моделей (ИИ), которые автоматизировали обмен информацией в письменной форме, но не решили проблемы овладения устной речью на иностранном языке. Эти трудности часто обусловлены артикуляционной интерференцией родного (L1) и изучаемого (L2) языков, при этом недостаток индивидуализированных учебных материалов для языков разного грамматического и фонетического строя усугубляет ситуацию. В 2024-2025 гг. в МГУ разработана нейросетевая модель для автоматической идентификации сегментных произносительных ошибок в русской речи инофонов – носителей китайского языка. Её успешная апробация открывает перспективы для анализа речи носителей других языков и изучения наиболее сложных проявлений иноязычного акцента. Помимо ошибок на уровне отдельных звуков, иноязычный акцент формируется из-за переноса позиционных закономерностей L1 на русский язык, особенно в сочетаниях согласных (консонантных кластерах). В отличие от сегментных ошибок, эти позиционно-обусловленные явления изучены недостаточно, отчасти из-за сложности обработки больших массивов речи. В данной работе представлены методика и первые результаты нейросетевого акустического исследования наиболее частотных позиционных ошибок в устной речи на русском языке носителей китайского языка.

Работа выполнена в рамках госзадания МГУ имени М.В. Ломоносова № 1025091200066-4-6.2.2.

Ключевые слова: фонетическая интерференция, иноязычный акцент, нейросетевая модель, позиционные ограничения, консонантные кластеры.

Neural network-based study of position-dependent pronunciation errors in the Russian speech of non-native speakers

G.Ye. Kedrova[1,a], V.Ya. Chuchupal[2,b], N.I. Mironova[3,c]

[1] *Lomonosov Moscow State University. Moscow 119191, Russia.*

[2] *Federal Research Center "Computer Science and Control" of Russian Academy of Sciences. Moscow 119333, Russia*

Sternberg State Institute of Astronomy, Moscow State University. Moscow 119191, Russia.

[3] *Lomonosov Moscow State University. Moscow 119191, Russia.*

E-mail: [a]gekedrova@yandex.ru , [b]v.chuchupal@gmail.com , [c]mironnat@rambler.ru

Abstract: Pronunciation errors that are poorly perceived by foreign language learners currently pose a serious obstacle to successful intercultural communication. The relevance of this issue has grown with the spread of large language models (AI), which have automated written information exchange but have not resolved the challenges of mastering spoken foreign language production. These difficulties are often caused by articulatory interference between the native language (L1) and the target language (L2), with the lack of individualized learning materials for languages of different grammatical and phonetic structures further exacerbating the situation. In 2024–2025, a neural network model was developed at Lomonosov Moscow State University for the automatic identification of segmental pronunciation errors in the Russian speech of foreign-language speakers—specifically, native speakers of Chinese. Its successful testing opens up prospects for analyzing the speech of speakers of other languages and for studying more complex manifestations of foreign accents. In addition to errors at the level of individual sounds, foreign accents arise from the transfer of positional patterns of the L1 onto Russian, particularly in consonant clusters. Unlike segmental errors, these positionally conditioned phenomena remain insufficiently studied, partly due to the difficulty of processing large speech corpora. This paper presents the methodology and initial results of a neural network-based acoustic study of the most frequent positional errors in the oral Russian speech of Chinese speakers.

Keywords: phonetic interference, foreign accent, neural network model, positional constraints, consonant clusters.

PACS: 01.40.gb

Acknowledgements. The work was carried out within the framework of the state assignment of Lomonosov Moscow State University No. 1025091200066-4-6.2.2.

Введение

Актуальность выявления типичных устойчивых ошибок в русской речи инофонов, обусловленных интерференцией родного (L1) и изучаемого (L2) языков, а также поиск эффективных методов их коррекции не вызывает сомнений у методистов и преподавателей-практиков. Как отмечают М.Н. Шутова и С.С. Хромов [1], произносительные ошибки при изучении иностранного языка, которые часто затрудняют понимание иноязычной речи и отличаются высокой устойчивостью к устранению из-за недостаточной их осознанности говорящим, представляют собой серьёзное препятствие на пути к полноценной межкультурной коммуникации. Хотя в большинстве случаев интерференция носит предсказуемый характер, механизм этого явления не всегда очевиден. Зачастую существующие модели прогнозирования нарушений отражают лишь отдельные аспекты интерференции, тогда как реальное явление охватывает значительно более широкий спектр отклонений — из которого необходимо выделить и систематизировать типичные ошибки, вызванные взаимодействием фонетических систем контактирующих языков на всех уровнях. Во всех описаниях типичных ошибок иностранных учащихся отмечается стойкое нарушение правил озвучания консонантных кластеров русского языка, поскольку в русском языке в ходе его истории сформировалось достаточно большое количество и разнообразие сочетаний согласных звуков, в которых действуют специфические комбинаторные изменения, связанные с взаимодействием звуков в процессе артикуляции. Реализация носителями китайского языка сочетаний согласных звуков при производстве речи на русском языке неоднократно привлекала внимание российских и китайских ученых и преподавателей, поскольку задача повышения эффективности методик обучения китайских студентов нормативному русскому произношению стоит сегодня особенно остро. Так, слуховой анализ звукозаписей русской речи китайцев выявил следующие основные особенности сегментных ошибок, которые делают китайскоговорящие при озвучании консонантных кластеров: 1) систематическая замена звуков в кластерах китайскими аналогами; 2) регулярная вставка гласного между согласными кластера; 3) выпадение согласных из кластера; 4) оглушение одного из согласных в кластере; 5) озвончение одного из согласных в кластере [2]. Однако виды нарушений инофоном действующих в сочетаниях согласных звуков русских ассимиляционно-диссимиляционных позиционно-обусловленных произносительных законов и правил остаются до настоящего времени практически не описанными для разных пар контактирующих языков. Нам представляется, что этот аспект проявления межязыковой интерференции остается недоизученным в связи с неразработанностью до настоящего времени эффективного программного аппарата анализа больших объёмов звучащего материала, требующего эффективных средств автоматического транскрибирования и

аннотирования, без чего представляется невозможным описать и систематизировать соответствующий материал. Поэтому мы считаем, что успешная апробация разрабатываемой в МГУ нейросетевой модели идентификации произносительных ошибок в русской речи инофонов [3] открывает перспективы для более глубокого анализа закономерностей проявления позиционно-обусловленной фонетической интерференции в речи носителей разных языков, а также дает возможность прогнозировать её характеристики, исходя из методологии «учета переноса закономерностей первичной фонетической системы на изучаемую» [4: 230].

1 Материал и методы

Для исследования произносительных ошибок китайскоговорящих при реализации русских консонантных кластеров использовались студийные аудиозаписи прочтения 20 дикторами, для которых китайский язык является родным, 1428 слов сбалансированного фонетического словаря наиболее частотных ритмических структур (РС) русского языка, в котором представлены все типы позиционных изменений русских фонем, а также все виды частотных консонантных сочетаний. [5] Для автоматической идентификации произносительных ошибок использовалась русскоязычная версия многоязычной самообучающейся языковой модели wav2vec 2.0, дообученная на корпусе аудиозаписей идентичного лексического материала, полученных от 15 русских дикторов. Для последующего слухового и акустического анализа были выбраны следующие консонантные сочетания, в которых наблюдалось наибольшее количество произносительных ошибок (Таблица 1).

Таблица 1

Консонантные кластеры

Тип кластера/позиция в слове	Начало слова	Середина слова	Конец слова
СС	сбор, сделать, вход, вкус, вчера, входить, всё, все, сдавать, вполне	резкий, также, сказка, низкий, подход, лёгкий, редкий, везти, близко, автор, узкий, уезжать	поезд, лезть
ССС	вставать, вслух	представление, завтра, представить	-
СССС	встречать	-	-

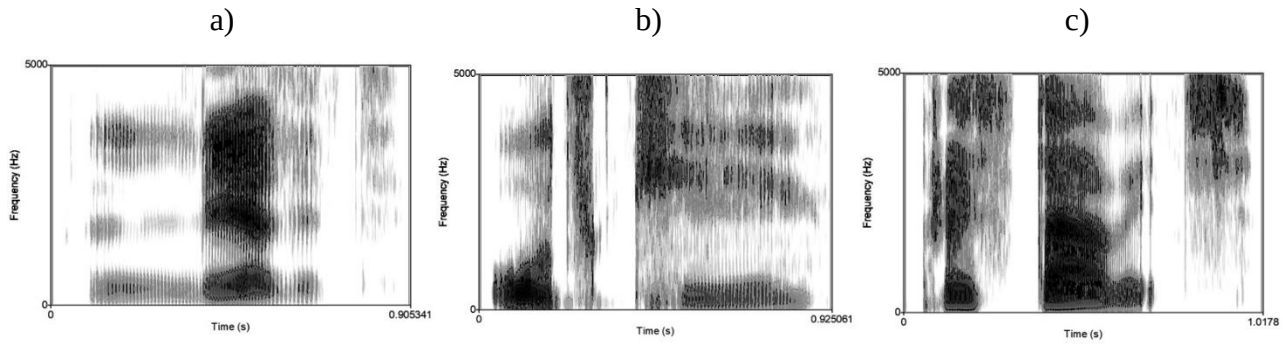
2 Результаты

Как известно, в русском языке обязательной является полная или частичная ассимиляция в сочетаниях согласных звуков. В обоих случаях в литературном русском языке ассимиляция

регрессивная, то есть последующий звук оказывает влияние на предыдущий. В китайском языке жесткая структура слога (обычно «согласный + гласный») исключает взаимовлияние (ассимиляцию/диссимиляцию) согласных звуков в силу запрета на стечение согласных. Объяснение правил ассимиляции согласных дается в учебниках русской фонетики для иностранных учащихся достаточно рано, однако полученные нами результаты показывают, что этот аспект русской фонетики недостаточно усвоен даже достаточно продвинутыми (уровень B2) китайскоговорящими. Анализ ошибочных произносительных стратегий, к которым прибегают китайские дикторы для реализации перехода между составными компонентами консонантного сочетания и которые являются источником акцентного произношения, поскольку нарушают фундаментальный для русского языка принцип ассимиляции согласных в консонантных кластерах, показал следующее. Наиболее устойчивыми ошибками является отсутствие озвончения в сочетании с последующим звонким согласным («также» → /т**а**кжъ/) или замена второго в сочетании звонкого согласного на его глухую пару, возможно, под влиянием глухости предшествующего согласного звука («сбор» → /спор/), что может рассматриваться как проявление прогрессивной ассимиляции. Еще более частотным фонетическим нарушением является отсутствие оглушения в сочетании звонкого согласного с глухими согласными («вчера» → /вч’ир**а**/). В целом баланс количества произносительных ошибок, вызванных неправомерным озвончением или оглушением согласного в консонантном кластере, склоняется в сторону предпочтительности стратегии произносить без участия голоса все согласные в сочетании, например: «встречать» → /фстр’еч’**а**т’/; /фэстър’еч’**а**т’/, но: /выстр’еч’**а**т’и/ (единичное); «вполне» → /фъпалн’**е**/, /фп^{x}алн’**е**/, но: /въпалн’**е**/ (единичное); «подход» → /патъх**о**т^{x}/, но: /падъх**о**дъ/, /падв**о**т/; «редкий» → /р**е**тк’иь/, /л’**е**тк’и/, но: /р’еедк’ij/ (единичное); «сдавать» → /став**а**т’/, но: /сдав**а**т’/ (единичное); «сделать» → /ст’**е**лат’/, но: /съд’**е**лат’ь/; /д’**е**лат’ь/. Полученные данные позволяют выделить несколько произносительных стратегий, к которым прибегают китайские дикторы для реализации перехода между составными компонентами консонантного сочетания, которые становятся источником акцентного произношения, поскольку нарушают фундаментальный для русского языка принцип ассимиляции согласных в консонантных кластерах. Наиболее частотным является вставка гласного звука, которая «разбивает» единый произносительный комплекс на слоги и предоставляет говорящему свободу выбора для реализации признака «глухость-звонкость» в каждом из компонентов сочетания (см. сонограмму произношения слова «лезть» как /л’**е**з’ит’/ на рис. 1, a); достаточно часто встречается неправомерное озвончение согласного как проявление гиперкоррекции (особенно у дикторов с высоким уровнем владения языком) (см. сонограмму произношения слова «узкий» как /**у**зк’ij/ на рис. 1, b); для многокомпонентных сочетаний согласных звуков

наиболее частотным становится элизия согласного (см. сонограмму произношения слова «представить» как /пр’ест**а**вит’/ на рис. 1, c).

Рисунок 1. Сонограммы произнесения слов: a) «лезть», b) «узкий», c) «представить».



3 Заключение

Основные причины акцента у китайцев при произношении русских стечений согласных — это несколько типов ошибочных артикуляционных стратегий. Их анализ требует учёта позиционных правил как родного (китайского), так и изучаемого (русского) языков. Разработанные в проекте методики, включая нейросеть, дообученную на большом массиве звучащей речи, доказали свою эффективность: они позволяют автоматически выявлять ошибки в произношении, проверять лежащие в их основе стратегии и устанавливать связь между типом ошибок и реальным уровнем владения русским языком.

Список литературы

1. *Шутова М.Н., Хромов С.С.* Фонетический аспект в практическом курсе русского языка для иностранных студентов в период стажировки в Государственном институте русского языка им. А.С. Пушкина // Тезисы докладов IX Международной научной конференции «Фонетика сегодня». Москва, 2024.
2. *Сунь Бо, Раднаева Л.Д.* Особенности реализаций консонантных кластеров // Вестник Бурятского государственного университета. Филология. 2025. Вып. **2**. С. 26–31.
3. *Кедрова Г.Е., Миронова Н.И., Чучупал В.Я.* Типичные артикуляционные стратегии китайских студентов при освоении русского произношения и возможности нейросетевого анализа // *Вестник Московского университета. Серия 9: Филология*. — 2025. — № **5**. — С. 73–84.
4. *Бархударова, Е.Л.* К проблеме анализа «позиционного» акцента в русской речи иностранцев / Е.Л. Бархударова // Труды института русского языка им. В.В. Виноградова. – 2023. – № **4**. – С. 230-239.
5. *Златоустова Л.В., Вещикова И.А., Омельянова Е.Б.* Компьютерный словарь частотных слов и ритмических структур русской речи // Вест. Моск. ун-та. Сер. 9. Филол. 1993. № **9(5)**. С. 16–24.

УДК: 81`34 : 534.78 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39695

КРИТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ БАЗОВЫХ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ ГЛАСНЫХ

О.Н. Морозова[1,a], Н.С. Уртегешев[2,b]

[1] *Амурский государственный университет. 675028, Российская Федерация, Амурская область, г. Благовещенск, Игнатьевское шоссе, д. 21.*

[2] *Институт филологии СО РАН. 633090, Российская Федерация, Новосибирская область, г. Новосибирск, ул. ак. Николаева, 8.*

E-mail: [a]morozova_olga06@mail.ru, [b]urtegeshev@mail.ru

Аннотация: В докладе представлен критический анализ устоявшихся в фонетике представлений о прямой корреляции между акустическими и артикуляционными параметрами гласных. Классический подход рассматривает спектральные характеристики (F1, F2) как однозначные детерминанты звукотипа, производные от положения языка и губ. С применением комплексной методологии (спектральный анализ, визуализация артикуляции, аудитивный контроль) выявлена иная взаимосвязь. Установлено, что артикуляционная настройка звукотипа физиологически обусловлена активностью мускулатуры гортани и истинных голосовых связок, опосредованной связью с подъязычной костью. В связи с этим признаки «ряда» и «подъёма» предлагается интерпретировать как результат сложного физиологического процесса, где формантные показатели выступают вторичным отражением позиции языка. Показано, что, несмотря на закономерные формантные зависимости, пересечения артикуляционных зон и формантных диапазонов разных звукотипов не влияют на их аудитивное различение. Сделан вывод, что машинный анализ речи, основанный исключительно на формантных показателях без слухового контроля экспериментатора, может приводить к неадекватным результатам, особенно при обработке незнакомой речи.

Ключевые слова: гласные, артикуляция, акустика речи, ряд, подъем, дополнительная артикуляция, палатализация, веляризация.

A CRITICAL ANALYSIS OF THE BASIC PARAMETERS OF THE ACOUSTIC CLASSIFICATION OF VOWELS

O.N. Morozova[1,a], N.S. Urtegeshev[2,b]

[1] *Amur State University. 21 Ignatyevskoe Shosse, Blagoveshchensk, 675028, Russia.*

[2] *Institute of Philology, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 8 Academician Nikolaev St., Novosibirsk, 630090, Russia.*

E-mail: [a]morozova_olga06@mail.ru, [b]urtegeshev@mail.ru

Abstract: The paper presents a critical analysis of the established notions in phonetics regarding the direct correlation between acoustic and articulatory parameters of vowels. The classical approach considers spectral characteristics (F1, F2) as unambiguous determinants of sound type, derived from the position of the tongue and lips. By applying a comprehensive methodology that includes spectral analysis, articulation visualization (MRI, radiography), and auditory control, a different relationship is revealed. It has been established that the articulatory setting of a sound type is physiologically conditioned by the activity of the true vocal folds and laryngeal musculature, mediated by the connection with the hyoid bone. Accordingly, the features of "vowel height" and "backness" should be interpreted primarily as the result of a complex physiological process, of which formant values are a secondary reflection, recording exclusively the position of the tongue. Despite regular formant dependencies, intersections of articulatory zones and formant ranges of different sound types do not affect their auditory discrimination. It is concluded that machine speech analysis based solely on formant values without the experimenter's auditory control may lead to inadequate results, especially when processing unfamiliar speech.

Keywords: vowels, articulation, speech acoustics, vowel backness, vowel height, additional articulation, palatalization, velarization

Введение

В настоящем исследовании в качестве базовых параметров акустической классификации гласных рассматриваются ряд и подъем, определяемые по частотным характеристикам первых двух формант. При автоматизированном выявлении формантных показателей вокальных настроек с использованием компьютерных программ возникает фундаментальная проблема корреляции акустических данных с артикуляционными параметрами, а именно — соотнесения формантных значений с конкретным звуковым типом. Установлено, что при идентичных формантных показателях могут реализовываться различные звукотипы, что ставит под сомнение однозначность акустического критерия в идентификации гласных [1].

Данная проблема была осознана исследователями уже на ранних этапах внедрения методики спектрального анализа. Однако ни расширение круга учитываемых формант, ни переход к частотным соотношениям внутри формантной структуры, ни учет амплитудных

характеристик не обеспечили качественного подхода к определению гласных исключительно на акустической основе.

Для достижения адекватной квалификации экспериментальных данных необходимо соотнесение выявленных спектральных характеристик с визуальным представлением артикуляторной настройки, сгенерировавшей соответствующий акустический сигнал. Данная процедура должна осуществляться при обязательном контроле и корректировке выводов методом аудиовизуального наблюдения как со стороны экспериментатора, так и со стороны дикторов, участвующих в эксперименте. Только соблюдение указанного триединства методологических подходов способно обеспечить достоверность интерпретации инструментальных данных.

Проблематика построения корреляционной модели звука, устанавливающей взаимосвязь его артикуляционных и акустических параметров, несмотря на активную разработку, сохраняет высокую дискуссионность и относится к числу наиболее сложных и недостаточно разработанных.

Материалы и методы

Материалом для исследования послужили изолированные словоформы, словосочетания и связанные тексты, записанные от носителей языков различных семей (тюркских, монгольских, тунгусо-маньчжурских). Звуковые файлы обрабатывались в программах Audacity и SpeechAnalyzer 3.0.1. При сегментировании словоформ использовалась методика, применяемая в Лаборатории экспериментально-фонетических исследований (ЛЭФИ) им. В.М. Наделяева Института филологии СО РАН.

Кроме того, в работе были использованы рентген- и магнитно-резонансные томограммы (статичные и динамические), а также дентопалатограммы, которые описывались с помощью методик, принятых в ЛЭФИ [2]. Вслед за В.М. Наделяевым мы считаем, что «нельзя говорить о подъеме языка или его частей при настройках гласных; наоборот, во всех настройках гласных фактически происходит снижение языка» [3, с. 26]; поэтому у гласных выделяется не подъем, а ступень отстояния. Для точной записи консонантных настроек использовалась универсальная унифицированная фонетическая транскрипция (УУФТ) В.М. Наделяева [4], разработанная в середине прошлого века для передачи звучащей речи языков СССР на письме, позже дополненная и уточненная сотрудниками ЛЭФИ им. Наделяева.

Результаты и обсуждение

Комплексное применение слухового, акустического и соматических методов анализа лингвистического материала на материале языков различных семей позволило выявить

наблюдения, существенно корректирующие устоявшиеся представления о детерминированности базовых формантных показателей.

В фонетической традиции закрепился стереотип, согласно которому, например, гласные типа «i» и «e» квалифицируются как переднего ряда с показателем второй форманты выше 1800 Гц, тогда как гласные типа «u» и «o» – как заднего ряда со значениями F2 ниже 1100 Гц. Однако данные магнитно-резонансной томографии свидетельствуют об ином (рис. 1–2).



Рис. 1. Томограмма ***веляризованного*** гласного [e$^{ɣ}_{2}$] = [e$^{ɣ}_{29.2}$] = [e$^{ɣ}_{2e9.2}$] в башкирском слове [je$^{ɣ}_{2}$ˑl] (лит. *йыл*) ‘год’.

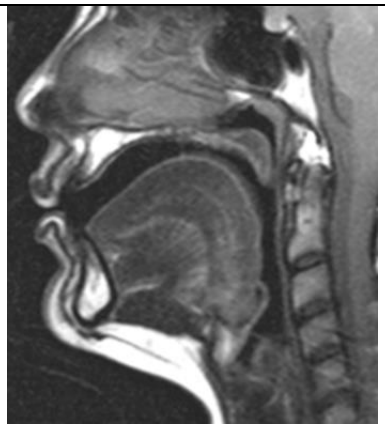


Рис. 2. Томограмма ***веляризованного*** гласного [u$^{ɣ}_{2}$] = [u$^{ɣ}_{29.2}$] = [u$^{ɣ}_{2e9.2}$] в башкирском слове [kʉ̃$^{ɣ}_{2}$ˑk^{ɕ}] (лит. *кук*) ‘синий’.

При сходном положении языка в задней части ротовой полости на слуховом уровне реализуются типологически различные гласные (рис. 1–2): «e»-образная настройка с плоской лабиализацией и «u»-образная с круглой лабиализацией. В акустическом плане при этом фиксируются близкие формантные показатели: «e»-образная настройка с плоской лабиализацией и «u»-образная настройка с круглой лабиализацией характеризуются значениями F1 в диапазоне 400–500 Гц и F2 – 1200–1400 Гц.

Полученные данные позволяют утверждать, что признаки «ряда» и «подъёма» не являются прямым отражением артикуляторной настройки, а представляют собой вторичные акустические корреляты более сложного физиологического процесса. Артикуляционная настройка звукотипа физиологически обусловлена активностью мускулатуры гортани и истинных голосовых связок, опосредованной связью с подъязычной костью. Подъязычная кость, связанная с гортанью и языком, регулирует положение языка в ротовой полости и отвечает за точность его движения [5, с. 17].

На основе анализа большого массива экспериментальных данных нами предлагается рассматривать уклад языка в ротовой полости не как основной классификационный признак, а как *дополнительную артикуляцию*, которая влияет на тембральную окраску гласного. По положению языка относительно небного свода выделяются четыре типа дополнительной артикуляции (табл. 1):

Таблица 1

Дополнительные артикуляции гласных по положению спинки языка в ротовой полости

ГОРТАННО-СВЯЗОЧНЫЕ								
1			Микширализованный (_)					
	Палатализованный (′)			Нейтрализованный			Веляризованный (ɣ)	
2	7.1-7.2	7.3	8.1	8.2	8.3	9.1	9.2	9.3
3	3000-2600	2599-2200	2199-1800	1799-1551	1550-1301	1300-1200	1199-900	899-550
4	c			d			e	
5	ГНО	ГО		ГНО		ГО	ГНО	ГО
1 140-399	ɪ / e / ъ	ɣ / ø		ɪ / e / ъ / a		ɣ / ø / u / o	ɪ / e / ъ	u / o
2 400-499	ɪ / e / ъ / a						ɪ / e / ъ / a	
3 500-600								
4 601-799	e / ъ / a	ø		e / ъ / a		ø / o	e / ъ / a	o
5 800-900	a			a		o		
				e / a		o	a	
6 901-1200				a		o		
				a		o		

Примечание к таблице: 1-я строка – название и расположение дополнительной артикуляции; 2-я строка – индексы небного свода; 3-я – диапазоны второй форманты (F_2, Гц); 4-я – участки спинки языка (c – средний, d – межуточный, e – задний); 5-я – округление во время работы голосовых складок: ГНО (гортанно-неокругленный), ГО (гортанно-округленные); 6-11-я строки – ступени отстояния (с первой по шестую) с диапазонами первой форманты (F_1, Гц). Буквы: **ɪ** – звуки типа «и» («i»), например, русский слог **тИ**; **e** – звуки типа «э» («e»), например, русский слог **тЭ**; **ø** – звуки типа «ö» («ö»), например, русский слог **рЁнь** [рьöнь]; **ɣ** – звуки типа «ÿ» («ÿ»), например, русский слог **рЮнь** [рьÿнь]; **a** – звуки типа «а» («a»), например, русский слог **тА**; **ъ** – звуки типа «ы» («ɨ»), например, русский слог **тЫ**; **o** – звуки типа «о» («o»), например, русский слог **тО**; **u** – звуки типа «у» («u»), например, русский слог **тУ**;

Ступень отстояния (вертикальное положение языка) влияет на степень выраженности дополнительной артикуляции: чем ниже положение языка, тем слабее выражена палатализация или веляризация.

Важно отметить, что гласные – это гортанно-связочные звуки, для которых обязательным условием является работа голосовых складок. Работа нервных окончаний, прикрепленных к голосовым складкам, создает необходимые колебания [6, с. 6, 254; 7, с. 299–312]. Лабиализация является дополнительным, а не основным признаком: гортанно-округленные гласные «о» и «у» могут быть произнесены без участия губ.

Вследствие сложной артикуляционной природы гласных и физиологических ограничений мышечной деятельности формируются закономерные формантные зависимости для каждого звукотипа. Наблюдаемые пересечения артикуляционных зон и диапазонов формантных

значений у разных звукотипов, однако, не оказывают влияния на их аудитивное различение. Это объясняется тем, что слуховая система опирается не на абсолютные формантные значения, а на комплекс артикуляторно-акустических признаков, включая динамику формантных переходов и спектрально-временные характеристики.

Заключение

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы.

Противопоставление гласных по признакам «ряда» и «подъёма» не является универсальным и не отражает непосредственно артикуляторной настройки. Формантные показатели (F1, F2) выступают вторичным отражением сложного физиологического процесса, в котором задействованы гортань, подъязычная кость и связанные с ними мышцы. Основой же вокальной настройки является работа гортанно-связочного аппарата.

Машинный анализ речи, основанный только на формантных показателях без слухового контроля экспериментатора, особенно при обработке незнакомой речи (например, при автоматическом транскрибировании), может приводить к неадекватным результатам. Достоверная интерпретация инструментальных данных возможна лишь при соблюдении триединства методологических подходов: акустического, артикуляторного и аудитивного.

Список литературы

1. *Григорьев В.И.* Дифференциальные признаки русских гласных /у, ы, и/ // Вопросы языкознания. 1962. № 1. С. 10–30.
2. *Селютина И.Я., Уртегешев Н.С., Летягин А.Ю., Шевела А.И., Добринина А.А., Эсенбаева Г.А., Савелов А.А., Резакова М.В., Ганенко Ю.А.* Артикуляторные базы коренных тюркских этносов Южной Сибири (по данным МРТ и цифровой рентгенографии). Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2012.
3. *Наделяев В.М.* Артикуляционная классификация гласных // Фонетические исследования по сибирским языкам. Новосибирск : Наука, 1980. С. 3–43.
4. *Наделяев В.М.* Проект универсальной унифицированной фонетической транскрипции (УУФТ). М. ; Л. : Изд-во АН СССР, 1960.
5. *Правдина О.В.* Логопедия : учеб. пособие для студентов дефектолог. фак-тов пед. инов. 2-е изд., доп. и перераб. М. : Просвещение, 1973.
6. *Юссон Рауль.* Певческий голос. Исследование основных физиологических и акустических явлений певческого голоса. М.: Изд-во «Музыка», 1974.
7. *Никольский А.А.* Влияние нейрохронаксической теории Рауля Юссона (Raoul Husson) на развитие исследований физиологических механизмов голосообразования в Советском Союзе (1950–1970-е годы) // Журнал общей биологии. 2024. Т. 85. № 4. С. 299–312.

УДК: 81'34 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39696

Акустические характеристики одноударных аллофонов в английской речи русских студентов и американцев

Андросова Е.Е.[1)], Андросова П.Е.[2)], Андросова С.В.[3)]
[1)-3)] Амурский государственный университет, Благовещенск;
Тел.: (962 2854654)
E-mail: androsova_s@mail.ru

Аннотация: Цель статьи – выявить разницу акустической картины одноударных аллофонов (альвеолярного удара/скольжения) [ɾ] в речи русскоязычных обучаемых, осваивающих стандартный американский вариант английского языка (СА), и в речи носителей СА, взятой за эталон. Материалом послужила скороговорка “Betty Botter”, содержащая 11 потенциальных позиций реализации одноударных в двух комбинаторно-позиционных условиях: 1) между неротацированными гласными и 2) между неротацированным и ротацированным гласными. Скороговорка была произнесена по одному разу женщиной (Af1) и мужчиной (Am2) – американцами – и трижды каждым из 22 русскоязычных испытуемых. Замеры производились в программе Praat. 22 эталонных реализации сравнивались с 726 реализациями обучаемых. Анализ длительности, интенсивности и частотных характеристик выявил общие черты наряду с отличиями. Среди эталонных реализаций у Am2 было 9 ударов и 2 глайда, у Af1 – 4 удара и 7 глайдов, все звонкие. Шум удара был менее четко локализован и занимал нижнюю или нижне-среднюю область частот. У испытуемых также были удары и глайды в разном соотношении, но встретились и реализации, где импульсный шум был четче локализован и занимал более широкий спектр частот, при этом линия F0 на одноударном иногда прерывалась. Длительность и интенсивность были схожи с эталонными.

Ключевые слова: фонетическая интерференция, одноударный аллофон, длительность, интенсивность, спектральная картина

Acoustic patterns of taps/flaps in English speech of Russian learners and Americans

E.E. Androsova[1)], P.E. Androsova[2)], S.V. Androsova[3)]
Foreign Languages Department, Amur State University, Blagoveshchensk, 675027, Russia.
E-mail: androsova_s@mail.ru

Abstract: This paper aims to examine the acoustic pattern variation of taps/flaps [ɾ] in the speech of Russian learners of Standard American English (SA) and native speakers of SA taken as a model. The material for the study was “Betty Botter” tongue twister with the total of 11 instances of tapping/flapping potential environment: (i) between non-rhotic vowels and (ii) between non-rhotic and rhotic vowel. The tongue twister was read 1 time by a female speaker (Af1) and a male speaker

(Am2) of SA and 3 times by each of 22 Russian learners. Praat was used for acoustic measurements. Thus, 22 model manifestations were compared to 726 manifestations produced by the learners. It was found that duration, intensity and spectral configuration patterns displayed common features along with differences. Both model patterns displayed taps (with impulse) and flaps (gliding) but in different proportions, with 9/2 in Am2 and 4/7 in Af1, all voiced, with the less clearly shaped impulse in taps localized in low and mid-low frequencies. In learner patterns, the impulse was more clearly shaped in a wider range of frequencies, F0 could be interrupted. Duration and intensity patterns showed much similarity.

Keywords: phonetic interference, tap/flap, duration, intensity, spectral pattern

Введение

Альвеолярный удар/скольжение (далее – одноударные) на месте орфографических -t-/-tt-, -d-/-dd- следует считать одной из характерных черт артикуляционной базы английского языка в разных территориальных вариантах и особенно в стандартном американском (далее – СА) (см., напр., [Herd et al., 2010; Bouavichith, Davidson, 2013; Cruttenden, 2014; Андросова, Караваева, 2015]). Одноударный упрощенно классифицируется как быстрый /d/. Акустическая же картина одноударных значительно варьирует: от более или менее выраженных точечных реализаций (taps) до скольжений (flaps) [Derrick, Schultz, 2013; Караваева, 2018]. Известно, что без широкого контекста носители языка чаще всего опознают сегменты, содержащие одноударные, как /d/ [Warner et al., 2009; Chong, Sundara, 2015; Караваева, 2018]. Это касается как точечных реализаций, так и скольжений, однако скольжения в два раза чаще воспринимаются как сонорные [Караваева, 2018]. При обучении одноударным обычно дается универсальная инструкция вместо /t/ произносить быстрый /d/. Для носителей русского языка можно апеллировать к схожести с родным вибрантом /r/.

Цель настоящей статьи – выявить разницу акустической картины одноударных аллофонов (точечных реализаций и скольжений) [ɾ] в английской речи русскоязычных обучаемых, осваивающих СА, и во взятой за эталон речи носителей СА. Это позволит акустически оценить уровень освоенности данного артикуляционного феномена.

1 Материал и методика исследования

Материалом послужила скороговорка “Betty Botter”, содержащая 70 реализаций фонем, и 11 потенциальных позиций реализации одноударных. Для одноударных представлено два комбинаторно-позиционных условия: 1) между неротацированными гласными и 2) между неротацированным и ротацированным гласными, 9 внутри слова и 2 на границе слов, 10 между ударным и безударным гласным и 1 между безударными гласными. Позиции охватывают одноударные только на месте -t-/-tt-. Реализация одноударного на месте фонемы

/t/ и, как следствие, замена данной фонемы на /d/, для восприятия неносителями языка может оказаться критическим фактором ухудшения понимания речи.

Скороговорка была произнесена по одному разу женщиной (Af1) и мужчиной (Am2) – американцами – и трижды каждым из 22 русскоязычных испытуемых (20 женщин и 2 мужчины: Rf/Rm 1-22). Гендерный дисбаланс обусловлен естественным составом группы обучаемых Запись эталонных образцов осуществлялась при стандартных параметрах оцифровки (44 кГц, 16 бит, моно) с помощью программы Audacity через микрофон на звуковую плату компьютера (произведена в 2002 году для фонетического курса). Запись образцов обучаемых производилась ими самостоятельно в 2025 году на диктофон мобильного телефона при более высокой частоте дискретизации (48 кГц по умолчанию). Поскольку форматы записи оказались разными (mp3, m4a, ogg), все файлы были конвертированы в формат .wav.

На момент записи испытуемые находились на третьем году обучения (5 семестр). Курс практической фонетики был пройден ими на первом году обучения. В течение всего периода обучения в ходе аудиопрактикума проводилась систематическая тренировка произнесения одноударных аллофонов в виде отдельного упражнения перед прослушиванием каждого аудиотекста. Изначально давалась инструкция произносить звук, похожий на русский [r], но с одним ударом. Для тех, кто вместо этого произносил английский плавный [ɹ], была дана инструкция произносить быстрый [d] вместо [t].

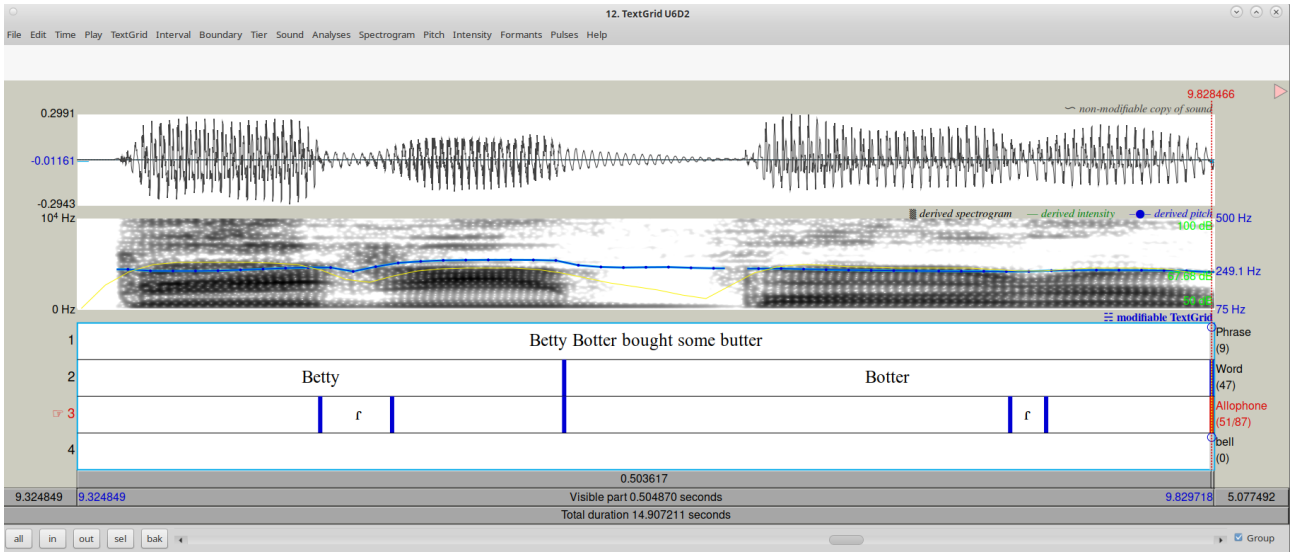


Рисунок 1. Пример поуровневой аннотации (Af1)

В программе Praat [Boersma, Weenink, 2022] была выполнена аннотация полученных речевых образцов, содержащая 3 уровня: в орфографической записи фраза и слово, аллофон (в транскрипции с использованием знаков международного фонетического алфавита). На третьем уровне на данном этапе исследования были сегментированы и затранскрибированы

только реализации в потенциальных позициях для одноударных (рис. 1). Использовался общий знак [ɾ] для всех случаев.

Эталонные реализации (22) сравнивались с реализациями обучаемых (726) по трем параметрам: длительность (мс), интенсивность (dB), конфигурация спектра (наличие смычки, импульса, формантной структуры, полноценного взрыва, а также широта полосы частот). По конфигурации спектра реализации были классифицированы либо как альвеолярный удар (АУ=tap), либо как альвеолярное скольжение (АС=flap), либо как взрывной [d].

2 Акустическая картина одноударных аллофонов

В таблице 1 приведено четыре примера результатов обработки данных с помощью инструментов описательной статистики: 1) для эталонных дикторов (Af1, Am2) – средние значения квартили 0-4; 2) для обучаемых – средние значения и усредненные по трем повторениям считалки квартили 0-4. В таблице 2 приведены примеры классификации по конфигурации спектра для двух эталонных дикторов и девяти из 22 обучаемых.

Таблица 1

Описательная статистика (Af1, Am2, Rf1, Rm3)

Диктор	Af1		Am2		Rf1		Rm3	
Параметр	Длит., мс	Интенс., dB	Длит., мс	Интенс., dB	Длит., мс	Интенс., dB	Длит., мс	Интенс., dB
Среднее	26	65	31	65	24	62	26	62
квартиль 0	16	60	19	59	16	57	18	58
квартиль 1	24	63	26	64	22	60	23	60
квартиль 2	28	65	29	65	24	62	25	62
квартиль 3	30	66	37	67	27	63	30	63
квартиль 4	32	71	45	68	34	64	33	65

Таблица 2

Классификация по конфигурации спектра

Диктор	Af1	Am2	Rf1	Rf2	Rm3	Rf4	Rm5	Rf17	Rf18	Rf21	Rf22
Соотношение АУ/АС/[d]	4/7/0	9/2/0	22/9/2	33/0/0	5/28/0	3/28/2	11/20/2	30/3/0	26/7/0	17/16/0	22/11/0

2.1 Эталонные реализации: носители языка

Среди эталонных реализаций у Am2 было 9 ударов и 2 глайда, у AF1 – 4 удара и 7 глайдов, все звонкие. Шум удара был менее четко локализован и занимал нижнюю или нижне-среднюю область частот (рис. 1 слева). Длительность варьировала в пределах 16–32 мс Af1 и 19–45 мс Am2.

Скольжения характеризовались наличием четко выраженной формантной структурой, как у сонорных, и немного большей интенсивностью по сравнению с точечными реализациями (рис. 1 справа). По шкале частот форманты занимали более низкую область спектра по сравнению с окружающими гласными. Длительность не была увеличена или сокращена по

сравнению с точечными реализациями. На обоих типах реализаций основной тон ни разу не прерывался.

2.2 Реализации обучаемых

Как и у носителей языка, у испытуемых были обнаружены точечные реализации и скольжения в разном соотношении. У четырех обучаемых количество скольжений превышало число точечных реализаций. В их речи были обнаружены ошибочные замены английский ретрофлексный глайд [ɹ]. У двух обучаемых количество глайдов и скольжений оказалось почти равным. У остальных количество точечных реализаций значительно превышало число скольжений, у двух скольжений не зафиксировано, еще у двух скольжения были единичными. Среди точечных реализаций встретилось немало таких, где импульсный шум был четче локализован и занимал более широкий спектр частот, как напр., на рис. 2.

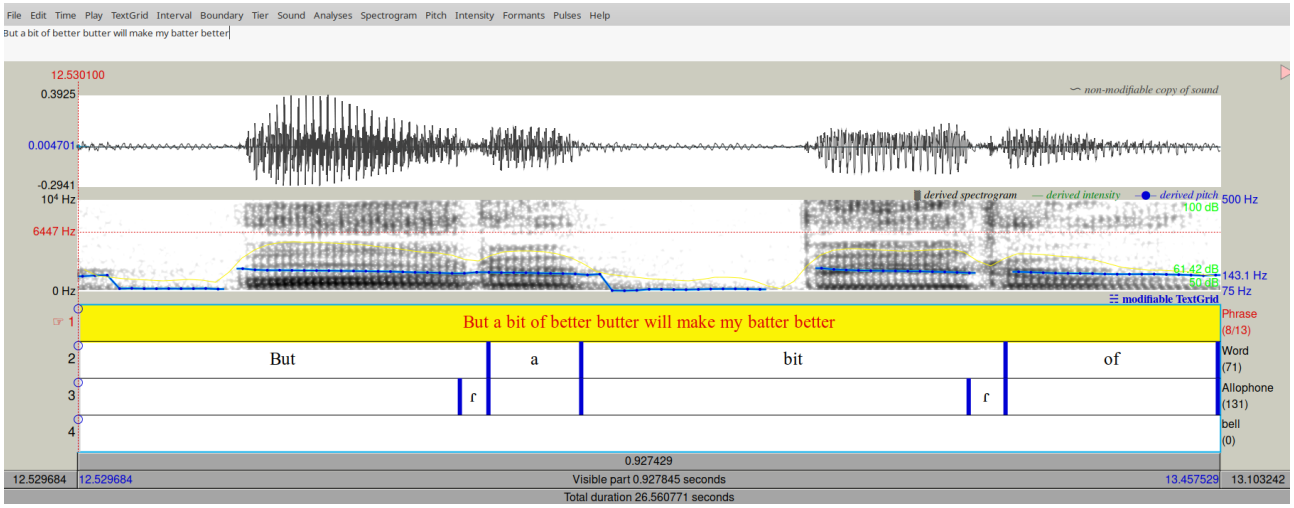


Рисунок 2. Альвеолярный удар с четко локализованным импульсным шумом (Rf17)

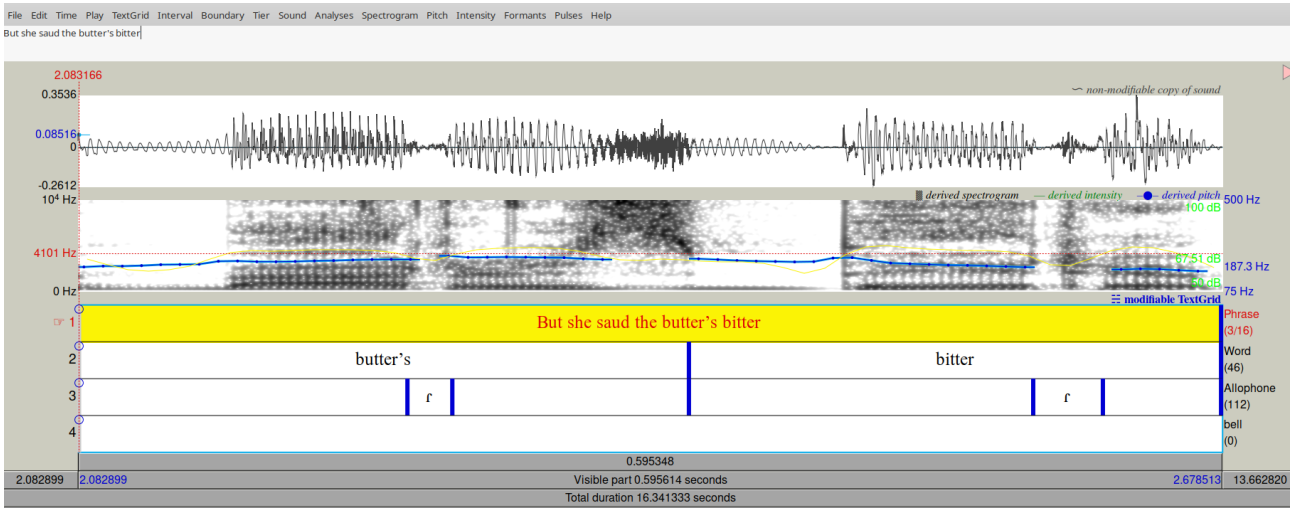


Рисунок 3. Двухударная и точечная реализации (Rf19)

Эти спектральные характеристики свидетельствуют о несколько больших артикуляционных усилиях, которые затрачивают обучаемые, чем те, которые прилагают носители языка. Возможно, это явилось следствием несколько утрированной артикуляции, характерной при

постановке произношения. Кроме того, были отмечены случаи реализации двухударного по аналогии с типичной картиной русского вибранта, который зачастую именно так и реализуется (рис. 3 слева). Линия основного тона на альвеолярном ударе в подавляющем большинстве случаев присутствовала, но могла и прерываться (см. рис. 2–3 справа) как следствие недостаточного озвончения.

Что касается скольжения с характерной формантной структурой в нижней области спектра, то часть таких реализации принципиально не отличалась от тех, что произведены носителями языка. Однако отличия наблюдались при замене на английский ретрофлексный глайд [ɹ]: не было характерной «воронки» интенсивности (спад в середине одноударного отсутствовал), формантные полосы занимали более широкий спектр частот (рис. 4).

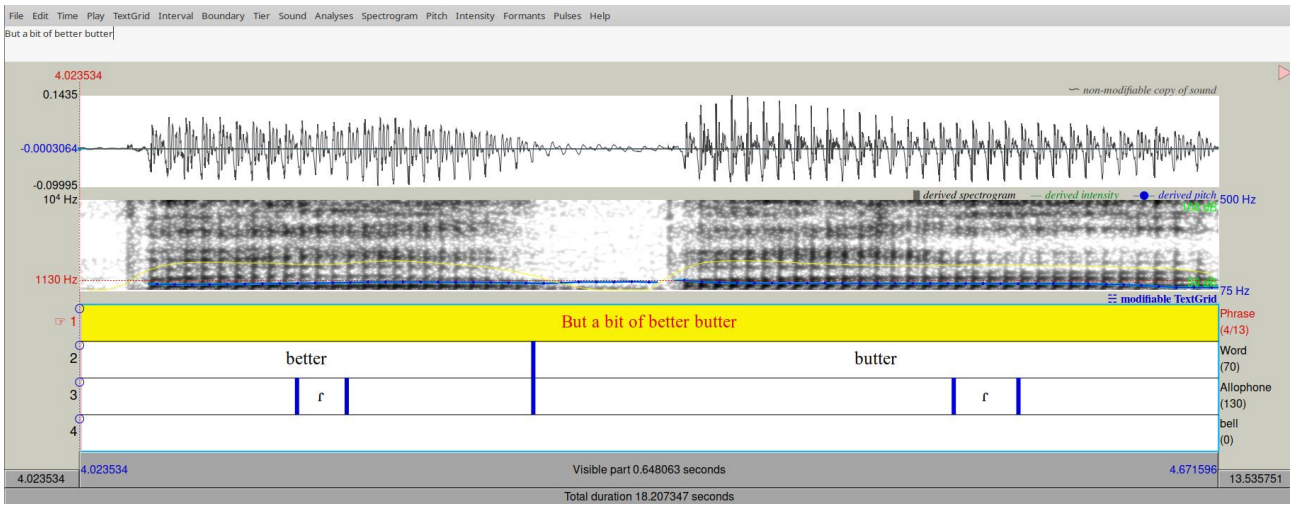


Рисунок 4. Реализации ретрофлексного глайда [ɹ] вместо [ɾ] (Rm3)

Заключение

Проведенное исследование позволяет констатировать принципиальную акустическую схожесть в реализациях альвеолярного удара/скольжения в речи носителей СА и в речи большинства обучающихся на материале СА. Схожесть по длительности и интенсивности обеспечивается скоростью артикуляции которую на данном этапе смогли продемонстрировать обучаемые, а также соблюдением интонации, характерной для американского эталона. Схожесть спектральной картины обусловлена правильным соблюдением артикуляционных инструкций, которые были даны испытуемым при знакомстве с феноменом альвеолярного удара/скольжения и его тренировкой в ходе обучения. Полученные результаты говорят об успешном усвоении этой важной черты артикуляционной базы английского языка в целом и СА – в частности. Вместе с тем, у некоторых испытуемых обнаружена проблема замены одноударного на более интенсивный и длительный плавный ретрофлексный с более четко выраженной формантной структурой, чего не делают носители языка.

Перспективу исследования составит перцептивная оценка речи обучаемых носителями американского варианта английского языка на предмет естественности произношения и его близости к американскому стандарту аналогично той, что была произведена ранее для составленных и рассказанных 10 обучаемыми кратких монологов [Андросова и др., 2024].

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 26-18-20146 «Фонетическая интерференция через призму слабых форм слов и явлений связной речи в языках Амурского трансграничья: русский, китайский, эвенкийский, английский».

Список литературы

1. *Herd W., Jongman A., Sereno J.* An acoustic and perceptual analysis of /t/ and /d/ flaps in American English // J. of Phonetics. 2010. N 38. P. 504–516. dx.doi.org/10.1016/j.wocn.2010.06.003
2. *Bouavichith D., Davidson L.* Segmental and prosodic effects on intervocalic voiced stop reduction in connected speech // Phonetica. 2013. Vol. 70. P. 182–206. https://doi.org/10.1159/000355635
3. *Cruttenden A.* Gimson's Pronunciation of English. 8th edn. London and New York: Routledge, 2014.
4. *Андросова С.В., Караваева В.Г.* Одноударные аллофоны в американском и британском вариантах английского языка // Теоретическая и прикладная лингвистика. 2015. **1,** № 2. С. 5–20.
5. *Derrick D., Schultz B.* Acoustic correlates of flaps in North American English // Proc. of Meetings on Acoustics. 2013. Vol. 19. Art. 060260.
6. *Караваева В.Г.* Перцептивные характеристики интервокальных согласных реализаций на месте орфографических -t-, -tt- (на материале британского новостного аналитического дискурса) // Вестн. Санкт-Петерб. ун-та. Язык и литература. 2018. **15,** № 3. С. 424–437. https://doi.org/10.21638/spbu09.2018.308
7. *Androsova S.V., Karavaeva V.G.* Intervocalic /t/ acoustic patterns in British News Analytical Discourse // 3L: Language, Linguistics, Literature. The Southeast Asian Journal of English Language Studies. 2024. **30,** 3. P. 177–192. http://doi.org/10.17576/3L-2024-3003-13
8. *Warner N., Fountain A., Tucker B.V.* Cues to perception of reduced flaps // JASA. 2009. **125,** N 5. P. 3317–3327.
9. *Chong A.J., Sundara M.* Perceptual similarity modulates context effects in online compensation for phonological variation // Proc. of AMP 2014. https://doi.org/10.3765/amp.v2i0.3761
10. *Boersma P., Weenink D. Praat:* Doing phonetics by computer (Version 6.2.19) [Computer Program]. URL: http://www.praat.org (дата обращения: 12.09.2022).
11. *Андросова Е.Е., Андросова П.Е., Андросова С.В.* Естественные модификации в связной английской речи русских студентов: пилотный эксперимент // Гуманитарные исследования. История и филология. 2024. N 16. С. 82–89. HYPERLINK "https://doi.org/10.24412/2713-0231-2024-16-82-

УДК: 004.89. DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39697

Мультимодальное распознавание эмоционального состояния человека с использованием малых языковых моделей

В.М. Цыгляев[1,a], О.В. Коротеева[1,b]

[1] *Университет ИТМО, Кронверкский пр., 49, Санкт-Петербург, 197101.*

E-mail: [a] vmtsyglyaev@itmo.ru, [b] makhnytkina@itmo.ru

Аннотация: В статье анализируются современные подходы к автоматическому распознаванию эмоциональных состояний человека на основе анализа текста и речи с помощью малых языковых моделей. Данное исследование сфокусировано на распознавании не только базовых эмоций (гнев, отвращение, радость, страх, удивление, грусть), но и составных эмоций, возникающих при одновременном проявлении нескольких базовых эмоциональных состояний. Рассматриваются большие языковые модели и малые языковые модели, применяемые для распознавания эмоций. Сравнительный анализ качества рассмотренных моделей осуществляется на мультимодальных наборах данных IEMOCAP, MELD, MAFW, C-EXP-DB.

Ключевые слова: распознавание эмоций, составные эмоции, языковые модели, машинное обучение, нейронные сети.

Multimodal recognition of human emotional state using small language models

V.M. Tsyglyaev[1,a], O.V. Koroteeva[1,b]

[1] *Department of Information Technology and Programming, ITMO University. St. Petersburg 197101, Russia.*

E-mail: [a] vmtsyglyaev@itmo.ru, [b] makhnytkina@itmo.ru

Abstract: This article analyzes modern approaches to automatic recognition of human emotional states based on text and speech analysis using small language models. This study focuses on recognizing not only basic emotions (anger, disgust, joy, fear, surprise, sadness) but also composite emotions arising from the simultaneous expression of several basic emotional states. Large language models and small language models used for emotion recognition are

considered. A comparative analysis of the quality of the models considered is performed on the multimodal datasets IEMOCAP, MELD, MAFW, and C-EXP-DB.

Keywords: emotion recognition, compound emotions, language models, machine learning, neural networks.

PACS: 07.05.Mh Neural networks, fuzzy logic, artificial intelligence

Введение

Сфера применения систем автоматического распознавания эмоций охватывает широкий спектр направлений: образование, маркетинг, рекрутинг, системы умного дома, персональные ассистенты. Однако в медицине и психологии определения только базовых эмоций недостаточно, т.к. человек в реальной жизни может одновременно проявлять сразу несколько эмоций. В данных областях появляется необходимость интерпретируемого анализа составных эмоций [1].

Упомянутая необходимость привела к использованию больших языковых моделей, которые способны объяснять логику вывода на естественном языке и адаптивно подстраивать ответ под эмоциональное состояние пользователя. Тем не менее, внедрение таких архитектур в системах реального времени и на мобильных устройствах затруднено из-за высоких вычислительных затрат. Для разрешения данного противоречия исследования все чаще смещаются в сторону малых языковых моделей, которые обеспечивают вычислительную мощность, необходимую для анализа базовых и составных эмоций, оставаясь при этом достаточно компактными для локального развертывания.

Цель настоящей работы – сравнительный анализ существующих методов использования больших и малых языковых моделей для распознавания базовых и составных эмоций на основе мультимодального анализа речи и текста.

1 Базовые и составные эмоции

Анализ эмоциональных состояний базируется на дифференциации базовых категорий и их составных форм. Согласно модели П. Экмана [2], которая, как правило, используется в большинстве наборов данных, базовые эмоции (радость, грусть, гнев, страх, удивление, отвращение) являются элементарными и обладают биологически детерминированными маркерами. В речи они определяются через физические

параметры (темп, высота, громкость), а в тексте — через специфический лексический набор и семантические конструкции.

Однако в естественной среде эмоции чаще имеют составной вид [3], возникая в результате комбинации двух и более базовых эмоций. Логическая структура таких состояний строится на принципе смешивания: например, «радостное удивление» или «печально-испуганный» представляют собой синтез соответствующих базовых компонентов, поэтому переход к составным эмоциям характеризуется необходимостью в анализе комбинаций, взаимосвязей и динамических изменениях между базовыми эмоциями [4, 5].

2 Методы распознавания эмоций

Наборы данных, которые используются для разработки и тестирования моделей распознавания эмоций, имеют, как правило, несколько модальностей, включая аудио и текст. Наборы данных можно разделить по условиям получения и видам эмоций. К числу постановочных наборов, записанных в лабораторных условиях, относится IEMOCAP. Эмоциональные проявления, воспроизведенные профессиональными актерами в рамках телевизионных шоу и развлекательных форматов, представлены в датасетах MELD и MAFW. В противоположность этому корпус C-EXPR-DB содержит материал, собранный в естественной, реальной обстановке. Необходимо отметить, что IEMOCAP и MELD преимущественно включают базовые эмоции, тогда как MAFW и C-EXPR-DB фокусируются на более сложных, составных эмоциональных состояниях. В таблице 1 представлено описание наборов данных.

Таблица 1

Описание наборов данных

Набор данных	Модальность	Аннотация	Объем
IEMOCAP	V+A+T	9 базовых эмоций + «другое», валентность-возбуждение	10 039 коротких видео клипов
MELD	V+A+T	7 базовых эмоций, валентность-возбуждение	1400 видео
MAFW	V+A+T	32 составные эмоции	10045 коротких видео клипов
C-EXPR-DB	V+A	12 составных эмоций, валентность-возбуждение	400 видео, 198 978 кадров

Систематический анализ применения мультимодальных больших языковых моделей (Gemini, Gemini-Lite, GPT-4o-Audio) для решения задачи распознавания эмоций без предварительного обучения [6] показал 51.8 % взвешенной F1 на датасете IEMOCAP и 62.8 % на MELD. В рамках экспериментов учитывался контекст диалога, а также использовался промптинг, запускающий проведение акустического анализа непосредственно самой моделью. Полученные результаты демонстрируют то, что стандартное применение больших языковых моделей без дорогостоящего дообучения характеризуется относительно низкими метриками качества.

В контексте применения малых моделей для распознавания базовых эмоций необходимо выделить метод SpeechCueLLM [7], который интегрирует акустические параметры речи в языковые модели через преобразование в текстовые описания на естественном языке. Такие характеристики, как средняя частота, вариативность тона, громкость, динамика и темп, внедряются в текстовый промпт, позволяя моделям Llama-3-8B и Llama-2-8B сопоставлять содержание фраз с акустическими нюансами. Данный подход был протестирован с помощью zero-shot классификации на датасетах IEMOCAP и MELD и показал, что метод значительно превосходит базовые текстовые модели, демонстрируя взвешенную F1-меру до 72.6 % на IEMOCAP и до 67.6 % на MELD.

Фреймворк MiSTER-E использует трех независимых экспертов [8], результаты которых динамически взвешиваются на логит-уровне. В основе метода лежат модели LLaMA-3.1-8B и SALMONN-7B, обеспечивающие высокоточное выделение признаков. Данный подход позволил достичь взвешенной F1 в 70.9% для IEMOCAP и 69.5% для MELD. Успех фреймворка объясняется модульной архитектурой, которая разделяет контекстное моделирование для каждой модальности перед выполнением мультимодального слияния.

Использование подходов на основе языковых моделей до сих пор ограничивается распознаванием базовых эмоций на классических наборах данных. Большие модели практически не используются для работы с составными эмоциями. В данной области доминируют малые модели, которые из-за меньшей нагрузки на систему легче, быстрее и с меньшими затратами поддаются специализированной настройке на специфических данных с составными эмоциями.

При работе с малыми языковыми моделями применяется текстовое представление мультимодальных данных [9]. В данном методе характеристики тона и валентность-возбуждение, полученные из аудио с помощью Wav2Vec 2.0, переводятся в текстовое описание, которое объединяется с расшифровкой речи и подается модели LLaMA -3-8B.

Рассмотренный метод достигает 65.50 % взвешенной F1-меры на MELD и 25.91 % взвешенной F1-меры на C-EXPR-DB. Данный метод дпоказывает низкую эффективность на данных из C-EXPR-DB из-за того, что авторы набора данных предоставляют только небольшую часть данных для обучения и тестирования.

Для анализа речи в наборе данных MAFW используется модель HumanOmni-Audio [10], построенная на базе Whisper-large-v3. Данный модуль управляет предварительной обработкой, кодированием и проекцией, необходимыми для синтеза текста. Благодаря введению полученных акустических характеристик и расшифрованного текста в малую языковую модель HumanOmni, система достигает невзвешенной средней полноты (Unweighted Average Recall, UAR) в 52.94% и взвешенной средней полноты (Weighted Average Recall, WAR) в 68.40%.

Результаты применения языковых моделей для распознавания эмоций по аудио и тексту представлены в таблице 2.

Таблица 2

Качество распознавания эмоций

Набор данных	Тип модели	Языковая модель	Метрика качества
IEMOCAP	Большая	GPT-4o Audio	51.8 %, weighted-F1
	Малая	LLaMA-2-7B	72.6 %, weighted-F1
MELD	Большая	Gemini	62.8 %, weighted-F1
	Малая	LLaMA-3.1-8B, SALMONN-7B	69.5 %, weighted-F1
MAFW	Малая	HumanOmni-7B	52.94 %, UAR; 68.40 %, WAR
C-EXP-DB	Малая	LLaMA -3-8B	25.91 %, weighted-F1

Заключение

На основе проведённого обзора можно заключить, что эффективность распознавания эмоций с применением малых языковых моделей определяется совокупностью факторов, среди которых ключевую роль играют выбор датасета, способ учёта контекста и методы объединения модальностей. Рассмотренные подходы на основе малых языковых моделей способны достигать результатов, превосходящих тяжеловесные аналоги, при условии корректного моделирования контекстуальных зависимостей, дообучения и согласованной обработки мультимодальных данных. Дальнейшее развитие методов распознавания эмоций, вероятно, будет связано с унификацией этапов обработки, повышением устойчивости к зашумлённым данным и более глубокой интеграцией контекстуальной информации на всех уровнях модели.

Список литературы

1. *Zhang J., Wang Z., Wang Z., Fu W., He Y., Zhu H., Lin Q., Liu J.* Towards Efficient and Robust Linguistic Emotion Diagnosis for Mental Health via Multi-Agent Instruction Refinement // arXiv preprint arXiv:2601.13481. 2026.
2. *Ekman P., Sorenson E. R., Friesen W. V.* Pan-cultural elements in facial displays of emotion // Science. 1969. **164**, N. 3875. P. 86-88.
3. *Du S., Martinez A. M.* Compound facial expressions of emotion: from basic research to clinical applications // Dialogues in clinical neuroscience. 2015. **17**, N. 4. P. 443-455.
4. *Joloudari J. H., Maftoun M., Nakisa B., Alizadehsani R., Yadollahzadeh-Tabari M., Gaftandzhieva S.* Complex emotion recognition system using basic emotions via facial expression, electroencephalogram, and electrocardiogram signals: a review // Frontiers in Psychology. 2026. **17**. P. 1682883.
5. *Zhou K., Sisman B., Rana R., Schuller B.W., Li H.* Speech synthesis with mixed emotions // IEEE Transactions on Affective Computing. 2022. **14**, N. 4. P. 3120-3134.
6. *Murzaku J., Rambow O*. Omnivox: Zero-shot emotion recognition with omni-llms // arXiv preprint arXiv:2503.21480. 2025.
7. *Wu, Z., Gong, Z., Ai, L., Shi, P., Donbekci, K., Hirschberg, J*. Beyond silent letters: Amplifying llms in emotion recognition with vocal nuances // Findings of the Association for Computational Linguistics: NAACL 2025. 2025. P. 2202-2218
8. *Dutta S., Balaji S., Ganapathy S.* A Mixture-of-Experts model for multimodal emotion recognition in conversations // Computer Speech & Language. 2026. **100**. P. 101965.
9. *Richet N., Belharbi S., Aslam H., Schadt M.E., González-González M., Cortal G., Koerich A.L., Pedersoli M., Finkel A., Bacon S.* et al. Textualized and feature-based models for compound multimodal emotion recognition in the wild // European Conference on Computer Vision. 2024. P. 60-78.
10. *Zhao J., Yang Q., Peng Y., Bai D., Yao S., Sun B., Chen X., Fu S. Chen W. Wei X.* et al. Humanomni: A large vision-speech language model for human-centric video understanding // arXiv preprint arXiv:2501.15111. 2025.

УДК: 612.8 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39698

Акустические характеристики материнской речи, обращенной к детям-близнецам

Куражова А.В.[1,2]

[1)]*Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, Санкт-Петербург, 194100, Литовская ул. 2*

[2)]*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург,199034, Университетская наб. 7\9*

Тел: (812) 416-52-88

E-mail: avk_spb@bk.ru

Аннотация: Цель работы – изучить и сравнить акустические характеристики речи матери, обращенной к детям-близнецам в парах. Участники исследования – триады «мать-близнецы» первых шести лет жизни. Проводили аудиозапись и видеосъемку вокально-речевого взаимодействия матери с детьми в домашних условиях в стандартных ситуациях. Осуществляли перцептивный и спектрографический анализ высказываний матери, обращенных к каждому из детей в паре. Для каждого высказывании определяли среднее значение частоты основного тона, диапазон частоты основного тона, длительность всего высказывания, длительность пауз между словами, считали среднее значение частоты основного тона и длительность ударных и безударных гласных из слов. Получены данные об особенностях материнской речи в триадах «мать-близнецы», выявлены индивидуальные различия во временных и спектральных характеристиках речи матери, обращенной к детям в паре, установлены особенности возрастной динамики акустических характеристик материнской речи в зависимости от уровня речевого развития ребенка.

Ключевые слова: близнецы, материнская речь, частота основного тона, спектрографический анализ речи

Acoustical characteristics of maternal speech addressed to twins

Kurazhova A.V. **[1), 2)]**

[1)] *Saint Petersburg State Pediatric Medical University, 194100, Saint Petersburg, Russia*

[2)] *Saint Petersburg State University, 199034, Saint Petersburg, Russia*

E-mail: avk_spb@bk.ru

The aim of the work is to study and compare the acoustic characteristics of the maternal speech addressed to children in pairs. The study participants are triads "mother-twins" of the first six years of the children. Audio- and video recording of the mother's vocal-speech interaction with children in

home conditions in standard situations were carried out. Perceptual and spectrographic analysis of the mother's statements addressed to each of the children in the pair was performed. For each utterance, the average value of the fundamental frequency, the range of the fundamental frequency, the duration of the entire utterance, the duration of pauses between words, the average value of the fundamental frequency, and the duration of stressed and unstressed vowels in words were determined. The data obtained on the features of maternal speech in mother-twin triads revealed individual differences in the temporal and spectral characteristics of maternal speech addressed to children in a pair, and the age-related dynamics of the acoustic characteristics of maternal speech due to the level of speech development of children.

Keywords: twins, maternal speech, fundamental frequency, spectrographic analysis of speech.

PACS: 43.60 c

Введение

Поведение матери при взаимодействии с детьми разного возраста является одним из факторов, влияющих на успешность овладения детьми родным языком, на формирование стиля взаимодействия ребенка с окружающими взрослыми и сверстниками. Материнская речь (МР), обращенная к детям раннего возраста, содержит целый комплекс характеристик, отличающих ее от речи, обращенной ко взрослому: гипертрофированная интонация, увеличение длительности гласных в словах, паузы между словами, упрощенные грамматические конструкции, звуковая игра, имитация звуков и слов ребенка [1, 2]. Такие особенности МР служат для привлечения внимания ребенка, активизации имитационной активности и способствуют освоению артикуляторных норм, характерных для родного языка. Родители при взаимодействии с детьми, развивающимися в соответствии с нормой и имеющими нарушения развития [3, 4], изменяют свою речь с учетом речевых способностей детей, тем самым стимулируя развитие у них навыков общения. В качестве факторов, влияющих на взаимоотношения матери и детей-близнецов, указывают депрессию, стресс, что приводит к изменению их эмоционального состояния, и нарушению взаимодействия в триаде [5, 6].

Целью настоящего лонгитюдного исследования является изучение характеристик материнской речи, обращенной к детям близнецам, на протяжении первых шести лет жизни, изучение динамики характеристик с возрастом детей, сравнение характеристик материнской речи в парах близнецов.

Методика

В исследовании принимали участие 5 триад «мать—дизиготные близнецы» в возрасте детей от 3 месяцев до 6 лет. Дети родились путем кесарева сечения на сроке гестации 36—38 недель, имели вес при рождении от 2100 г до 3580 г. Под первым и вторым ребенком понимали

порядок рождения ребенка в результате кесарева сечения. Возраст матерей на момент рождения детей-близнецов составлял от 24 до 32 лет (28±3 лет).

Методика исследования включала аудио и видеозапись речевого взаимодействия матери с детьми; экспертный анализ фрагментов речевого взаимодействия матери с детьми; перцептивный и инструментальный спектрографический анализ речи детей; статистический анализ данных. Запись поведения и речи матери в процессе взаимодействия с детьми проводили в домашних условиях с интервалом в 6 месяцев при спонтанном взаимодействии детьми в модельных ситуациях «лицо к лицу» (3-9 мес), «игра» (3 мес-24 мес), «чтение» (12 мес-36) мес; в возрасте 4-6 лет в диалоге с ребенком на заданные темы. Аудиозапись осуществляли на цифровой магнитофон «Marantz PMD660» с использованием выносного микрофона «SENNHEIZER e835S», для видеосъемки использовали камеру «Sony HDR-c X560E».

Проводили экспертный анализ фрагментов речевого взаимодействия матери с каждым из детей в паре в возрасте 3 мес, 6 мес, 1, 2, 4, 5, 6 лет длительностью до 20 с. Фрагменты оценивали эксперты — специалисты в области изучения детской речи (n=8, возраст — 28±6 лет). Эксперты заполняли анкеты, содержащие параметры, характеризующие МР и речь ребенка, соответствующие возрастному периоду [3]. На первом - втором году жизни 11 параметров в речи матери (примеры: фиксация взгляда на лице ребенка активность, изменение мимики, произнесение простых слов и звуков, повторение звуков, произносимых ребенком, простые фразы, изменение интонации (диапазон ЧОТ), увеличение длительности гласных, повторение одинаковых слов, паузы между фразами. 6 характеристик поведения ребенка (комфортное/дискомфортное состояние, произнесение звуков в ответ на речь матери, фиксация взгляда на лице матери, активное взаимодействие с матерью. В период с 2 до 6 лет в речи матери оценивали 19 параметров (примеры: проявление инициативы, эмоциональность, эмоциональное состояние, изменение интонации, длительности гласных, четкая артикуляция, обращение к ребенку, стимулирование к ответу) и 21 характеристику речи ребенка (примеры: инициатива, разборчивость речи, сложность реплик, повторение слов матери, эмоциональное состояние).

С помощью инструментального спектрографического анализа в звуковом редакторе Cool Edit Pro определяли временные и спектральные характеристики материнских высказываний - среднее значение частоты основного тона, диапазон частоты основного тона, длительность всего высказывания, длительность пауз между словами, считали среднее значение частоты основного тона и длительность ударных и безударных гласных из слов. В вокализациях и речи детей определяли длительность гласных, на стационарных участках

гласных определяли значение частоты основного тона (ЧОТ, F0) и первых двух формант (F1, F2).

Статистическую обработку данных проводили в программе «Statistica 10.0» с использованием непараметрического критерия Манна—Уитни, ранговой корреляции Спирмана, множественного регрессионного анализа.

Результаты

На первом году жизни детей МР, обращенная к близнецам, содержит преимущественно повествовательные предложения ($p<0.05$), обращения и комментарии, отсутствует звуковая игра, характерная для речи матерей нормативно развивающихся одиночно рожденных детей. В МР, обращенной к трехмесячным детям, вариативность ЧОТ составляет 120 Гц., диапазон значений ЧОТ в высказываниях, обращенных к шестимесячным детям, уменьшается, во втором полугодии жизни детей вариативность интонации в речи матери увеличивается ($p<0.05$). Установлены различия между материнскими высказываниями, обращенными к первому и второму ребенку из триады, по диапазону значений ЧОТ. На втором году жизни выявлены разные стратегии взаимодействия матери с детьми. Первая стратегия – мать активно привлекает внимание детей, ее речь грамматически проста, мать использует повторы одинаковых слов; вариативность интонации и длительность ударных гласных значимо больше ($p<0.05$), чем те же характеристики в речи, обращенной ко взрослым. Вторая стратегия - при общении с детьми, матери произносят простые слова, в их речи зарегистрировано меньше повторов, вариативность интонации и длительность ударного гласного значимо меньше ($p<0.001$), чем у матерей, придерживающихся первой стратегии. Выявлена взаимосвязь между уровнем речевого развития детей и характеристиками МР: у детей, при взаимодействии с которыми у матери в речи преобладают высказывания с диапазоном значений ЧОТ менее 100 Гц ($r=-0.87$, $p<0.05$), длительностью ударных гласных менее 100 мс ($r=-0.8$, $p<0.05$) и представлено небольшое количество повторов одинаковых слов ($r=-0.82$, $p<0.05$), то есть мать не стимулирует детей к имитационной активности, уровень речевого развития ниже - в речевом репертуаре выявлено малое количество слов из одного-двух слогов и небольшое разнообразие согласных звуков.

В период с 4 до 6 лет все матери проявляют инициативу при взаимодействии с детьми, но, согласно данным регрессионного анализа, в большей степени стимулируют к общению вторых по порядку рождения детей с более низким уровнем речевого развития ($F(1,70)=45.805$; $p<0.00001$; $R^2=0.396$; $\beta=0.628$), который определялся по структуре ответных реплик в диалоге с матерью, значениям ЧОТ, разнообразию произносимых согласных. При взаимодействии со вторыми по порядку рождения детьми, в том случае, если они не проявляют инициативу, ма-

тери произносят отдельные слова в ситуации пересказа или рассказа по картинке или отвлекаются от темы диалога, дополнительно стимулируя ребенка к ответу. Вторые дети произносят фразы, когда мать использует комплекс характеристик: ее речь эмоциональна ($F(20,51)=2.299$; $p<0.01$ $R^2=0.474$; $\beta=0.56$), она задает вопросы $\beta=0.849$) или отвечает на вопросы ребенка ($\beta=0{,}849$), обращается к ребенку по имени ($\beta=0.454$).

Заключение

Таким образом, полученные результаты подтверждают предположение о связи характеристик МР с уровнем речевого развития ребенка, о динамике характеристик МР с возрастом ребенка. Выявлены различия в характеристиках материнской речи, обращенной к первым и вторым детям из пары, в зависимости от их речевого поведения и возраста. В первые два года жизни детей наиболее широкий комплекс характеристик материнской речи способствует расширению вокально-речевого репертуара детей. В период с 4 до 6 лет в процессе речевого взаимодействия мать в большей степени стимулирует к общению вторых по порядку рождения детей, имеющих более низкий уровень речевого развития, используя более широкий диапазон характеристик материнской речи.

Список литературы

1. *Fernald A., Simon T.* Expanded intonation contours in mother's speech to newborns // Devel. Psychol. 1984. **20**. N 1. P. 104—113.

2. *Лаксо Е.Е.* Вокально-речевая имитация в диаде «мать—ребенок»: первый год жизни // Психологический журнал. 2005. **26**. № 3. С. 94—106.

3. *Lyakso E., Frolova O.* Speech interaction in "Mother-Child" dyads with 4—7 years old typically developing children and children with autism spectrum disorders // Lecture Notes in Computer Science. 2018. **11096**. P. 347—356. doi: doi.org/10.1007/978-3-319-99579-3_37.

4. *Mimeau C., Cantin E., Tremblay R.E., Boivin M., Dionne G.* The bidirectional association between maternal speech and child characteristics. 2019. Journal of Child Language. P. 1–22.

5. De Roose M., Beeckmana D., Eggermont K., Vanhouche E., Hecke A.V., Verhaeghe S. Level of parenting stress in mothers of singletons and mothers of twins until one year postpartum: A cross-sectional study. Women Birth, 2017. **31**, N 3. P. 197—203.

6. *Куражова А.В., Лаксо Е.Е.* Речевое развитие детей и вокально-речевое взаимодействие в триадах «мать—близнецы»: лонгитюдное исследование // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета. Серия 3. Биология. 2012. № 4. С. 93—103.

УДК: 534.78; 612.78 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39699

Акустические характеристики эмоциональной речи мальчиков 12–16 лет с типичным развитием, расстройствами аутистического спектра и интеллектуальными нарушениями: сравнительный анализ

Е.А. Клешнев[1)*], Е.Е. Ляксо[1)]

[1)]*Санкт-Петербургский государственный университет, Университетская наб. 7-9, Санкт-Петербург, Россия, 199034,*

E-mail:[*]*kleshnev.egor@gmail.com*

Аннотация. Цель исследования – выявить особенности и различия в акустических характеристиках спонтанной эмоциональной речи мальчиков-подростков 12-16 лет с типичным развитием (ТР), расстройствами аутистического спектра (РАС) и интеллектуальными нарушениями (ИН). В исследовании приняли участие 25 мальчиков 12-16 лет: 15 мальчиков с ТР, 5 мальчиков с РАС и 5 мальчиков с ИН. Запись эмоциональной речи проводили при выполнении подростками тестовых заданий методики оценки сформированности эмоциональной сферы детей CEDM. Использовали два метода анализа речи: перцептивный эксперимент, проводимый с целью распознавания аудиторами (n=12) эмоциональных состояний подростков по их речи; инструментальный спектрографический анализ. Спектрографический анализ речи детей проводили в программе «Cool Edit Pro 2.0». Считали: длительность; значения частоты основного тона (ЧОТ); минимальные и максимальные значения ЧОТ; вариативность ЧОТ; значения интенсивности по фразе, ударному слову и ударному гласному в слове. Состояние гнева аудиторы распознали только по речи подростков с РАС. Выявлены различия в акустических характеристиках эмоциональной речи подростков: диапазона ЧОТ и относительной интенсивности ЧОТ слов, длительности гласных. При распознавании эмоций аудиторы опирались на диапазон ЧОТ и относительную интенсивность у ТР мальчиков; максимальную и среднюю ЧОТ фраз у мальчиков с ИН; ЧОТ фраз, её диапазон и длительность стационарного участка у мальчиков с РАС

Ключевые слова: расстройства аутистического спектра, подростки, эмоциональная речь, акустические характеристики, интеллектуальные нарушения

Acoustic features of emotional speech in boys 12–16 years old with typical development, autism spectrum disorders, and intellectual disabilities: a comparative analysis

E.A. Kleshnev[1)*], E.E. Lyakso[1)]

[1)]Saint Petersburg State University, Universitetskaya Emb. 7-9, Saint Petersburg, Russia, 199034,

E-mail:*kleshnev.egor@gmail.com

Annotation. Aim of the study – to identify the features and differences in the acoustic characteristics of spontaneous emotional speech in adolescent boys aged 12–16 years with typical development (TD), autism spectrum disorders (ASD), and intellectual disabilities (ID). The study involved 25 boys aged 12–16 years: 15 boys with TD, 5 boys with ASD, and 5 boys with ID. Recording of emotional speech was conducted while the adolescents performed test tasks from the Child Emotion Development Method (CEDM). Two methods of speech analysis were used: a perceptual experiment aimed at recognizing the emotional states of adolescents by listeners (n=12), and instrumental spectrographic analysis. Spectrographic analysis of children's speech was performed using "Cool Edit Pro 2.0" software. We measured: duration; pitch values (F0); minimum and maximum F0 values; pitch values range; intensity values for the phrases, stressed words, and stressed vowels within the word. The emotional state of anger was recognized by listeners only from the speech of adolescents with ASD. Differences were revealed in the acoustic features of adolescents' emotional speech: pitch values range, relative intensity of word and vowel duration. When recognizing emotions, listeners relied on pitch values range and relative intensity in boys with TD; maximum and mean phrase F0 in boys with ID; phrase F0, its range, and steady-state duration in boys with ASD.

Keywords: autism spectrum disorders, adolescents, emotional speech, acoustic characteristics, intellectual disabilities

PACS: 43.70.+i; 43.71.+m

Введение

В работах, посвященным изучению эмоциональной речи людей с расстройством аутистического спектра (РАС), отмечают особенности акустических характеристик речи. Для РАС присущи высокие значения частоты основного тона (ЧОТ), диапазона ЧОТ, длительности высказываний [1, 2], трудности в контроле громкости голоса [1]. Высокие значения ЧОТ показаны и для детей с легкой степенью интеллектуальных нарушений (ИН)

[2]. Однако, они отличаются от детей с РАС артикуляционными особенностями и особенностями когнитивного развития, что осложняют их коммуникацию со сверстниками. Это, свою очередь, приводит к недостаточному эмоциональному развитию и невозможности освоения социально приемлемых паттернов выражения эмоций [3]. На материале русского языка были выявлены различия в проявлении эмоций в голосе у детей с ИН и РАС в возрасте 5-15 лет [4], но исследования, посвященные изучению акустических характеристик эмоциональной речи подростков с данными нарушениями, требует дальнейшего изучения.

Цель исследования – выявить особенности и различия в акустических характеристиках спонтанной эмоциональной речи мальчиков-подростков 12-16 лет с типичным развитием, расстройствами аутистического спектра и интеллектуальными нарушениями.

1. Методика

В исследования приняли участие 25 мальчиков подростков в возрасте 12-16 лет: 15 ТР мальчиков (14.4 ± 1.6 лет) не имели отклонений в развитии, нарушений слуха и зрения, обучались в общеобразовательных школах города Санкт-Петербург; 5 мальчиков (13.8 ± 0.8 лет) имели диагностированные ИН; 5 мальчиков (15 ± 1.2 лет) - РАС (30.4 ± 3 баллов по шкале Childhood Autism Rating Scale - CARS).

В исследовании использовали часть тестовых заданий методики оценки эмоционального развития детей (CEDM) [5]. Запись речи ТР подростков проходила в условиях лаборатории; подростков с ИН и РАС – на базе медицинского центра. Запись производили на магнитофон «Marantz PMD660» с выносным микрофоном «SENNHEIZER e835S». Спонтанную речь мальчиков отбирали из записей выполнения заданий методики CEDM: диалог экспериментатора с ребёнком со стандартным набором вопросов; интервью об эмоциях; рассказ по картинкам.

Создали 3 тестовые последовательности (ТР подростки, подростки с ИН, подростки с РАС), которые включали речевые сигналы (высказывания), выделенные из спонтанной речи каждого подростка. Каждая тестовая последовательность включала 50 речевых сигналов, интервал между сигналами – 5 с, каждый сигнал предъявляли один раз. Для распознавания эмоциональных состояний по спонтанной речи подростков провели перцептивный эксперимент с участием аудиторов (n=12, 25.1 ± 1.5 лет). Аудиторам предложили отнести каждый речевой сигнал к одному из четырех эмоциональных состояний – «радость, нейтральное, печаль, гнев». По результатам перцептивного эксперимента для дальнейшего акустического анализа были отобраны речевые сигналы, однозначно отнесённые аудиторами к эмоциональному состоянию (>75% ответов аудиторов). Спектрографический анализ речевого материала подростков проводили в звуковом редакторе «Cool Edit Pro». Считали: значения длительности; значения частоты основного тона (F0, ЧОТ, Гц), значения

интенсивности E (дБ) для фраз, ударных слов, ударных гласных; диапазон ЧОТ (F0max - F0min); относительную интенсивность ЧОТ (E0max/E0min).

2. Результаты

Состояния радости, печали и нейтральное были распознаны во всех группах подростков, состояние гнева аудиторы распознали только у подростков с РАС (табл. 1).

Таблица 1

Количество распознанных аудиторами сигналов, n

	Эмоциональные состояния			
Группы подростков	Радость	Нейтральное	Печаль	Гнев
ТР	9	12	4	0
ИН	9	15	4	0
РАС	9	9	5	2

Состояние радости характеризуется: наибольшими значениями диапазона ЧОТ слов и относительной интенсивности ЧОТ у ТР мальчиков; наибольшими значениями диапазона ЧОТ слов и средними значениями относительной интенсивности у мальчиков с РАС; наименьшими значениями диапазона ЧОТ и средними значениями относительной интенсивности у мальчиков с ИН. Состояние печали – наибольшими значениями диапазона ЧОТ и относительной интенсивности ЧОТ у мальчиков с ИН, наименьшими значениями диапазона ЧОТ у мальчиков с РАС и ТР (рис. 1. а, б.). Диапазон ЧОТ ударных слов выше у мальчиков с РАС по сравнению с мальчиками с ИН в нейтральном состоянии ($p < 0.001$ – критерий Манна-Уитни), и состоянии радости ($p < 0.01$). Относительные значения

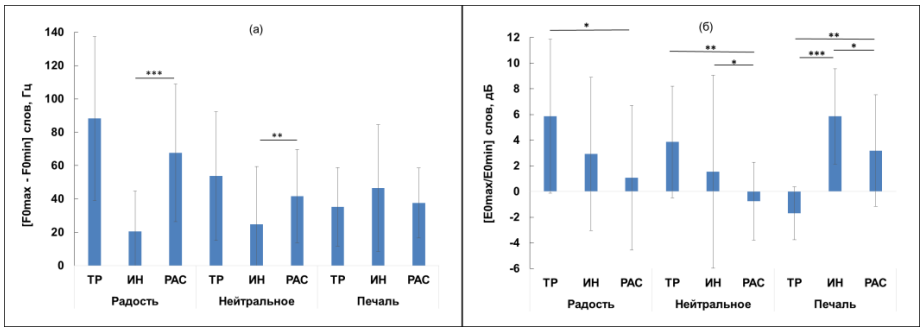


Рисунок 1. Диапазон ЧОТ и относительная интенсивность ЧОТ ударных слов мальчиков в эмоциональных состояниях «радость – нейтральное - печаль». По горизонтальной оси - эмоциональные состояния и группы подростков, по вертикальной оси – диапазон ЧОТ ударных слов, Гц (а), относительная интенсивность ЧОТ ударных слов, дБ (б). *** - $p < 0.001$, ** - $p < 0.01$, * – $p < 0.05$ – критерий Манна-Уитни, различия между группами мальчиков.

интенсивности ЧОТ выше: у ТР мальчиков в состоянии радости ($p < 0.05$) и нейтральном состоянии ($p < 0.01$) по сравнению с мальчиками с РАС; у мальчиков с ИН в нейтральном состоянии по сравнению с мальчиками с РАС ($p < 0.05$), состоянии печали по сравнению с мальчиками с РАС ($p < 0.05$) и ТР ($p < 0.001$); у мальчиков с РАС в состоянии печали по сравнению с ТР мальчиками ($p < 0.01$).

Состояние печали характеризуется наибольшей длительностью гласных для всех групп подростков; состояние радости – наименьшей длительностью гласных у ТР мальчиков и мальчиков с ИН. В нейтральном состоянии длительность гласных больше у ТР мальчиков ($p < 0.05$) и мальчиков с ИН ($p < 0.01$) по сравнению с мальчиками с РАС (рис. 2).

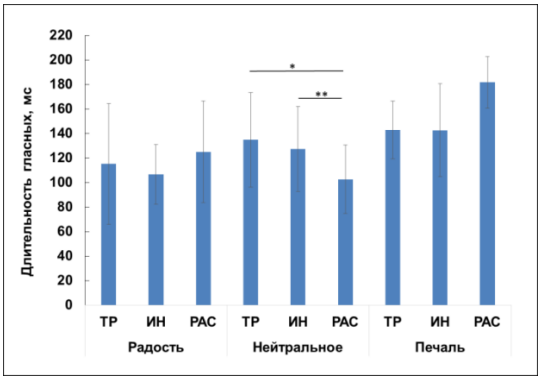


Рисунок 2. Длительность ударных гласных мальчиков в эмоциональных состояниях «радость – нейтральное - печаль». По горизонтальной оси - эмоциональные состояния и группы подростков, по вертикальной оси – длительность ударных гласных, мс.

** - $p < 0.01$, * – $p < 0.05$ – критерий Манна-Уитни, различия между группами мальчиков.

Методом регрессионного анализа установлены связи между акустическими характеристиками эмоциональной речи мальчиков и распознаванием их эмоционального состояния аудиторами (табл. 2). На эти акустические характеристики опирались аудиторы при определении эмоционального состояния подростков.

Таблица 2

Связь между эмоциональным состоянием подростков по оценке аудиторов и акустическими характеристиками речи (Регрессионный анализ)

Группы подростков	Эмоциональные состояния	Акустические характеристики	$p <$	R^2	β
ТР	Радость	F0max - F0min слов F(1,23) = 5,7669	.05	.21	.44
	Нейтральное	E0max/E0min фраз F(1,48) = 5,0571	.05	0.1	-.31
	Печаль	E0max/E0min слов F(1,48) = 6,2826	.05	.12	-.34
ИН	Нейтральное	F0max фраз F(1,48) = 4,2871	.05	.08	-.29
	Гнев	F0 фраз F(1,26) = 7,1928	.05	.22	.47
РАС	Нейтральное	F0 фраз F(1,48) = 4,1333	.05	.08	-.28
	Печаль	F0max-F0min фраз F(1,48) = 5,6490	.05	.11	-.32
		Длительность стационарного участка F(1,31) = 20,823	.001	.4	.63

Заключение

Проведен сравнительный анализ акустических характеристик спонтанной эмоциональной речи мальчиков-подростков 12–16 лет с ТР, РАС и ИН. Состояние гнева аудиторы распознали только в спонтанной речи подростков с РАС, что может говорить о

большей экспрессивности мальчиков с РАС по сравнению с мальчиками с ИН и ТР. Диапазон ЧОТ ударных слов наибольший у мальчиков с РАС в состоянии радости, у подростков с ИН — в состоянии печали. По значениям относительной интенсивности ЧОТ выявлены наиболее выраженные межгрупповые различия. Длительность ударных гласных в нейтральном состоянии минимальная у мальчиков с РАС по сравнению с ТР и ИН, а в состоянии печали — максимальная у групп с нарушениями развития. При распознавании эмоций аудиторы опирались на диапазон ЧОТ и относительную интенсивность у ТР мальчиков; максимальную и среднюю ЧОТ фраз у мальчиков с ИН; ЧОТ фраз, её диапазон и длительность стационарного участка у мальчиков с РАС. Полученные в текущем исследовании данные не согласуются с полученными ранее результатами на большей выборке детей с РАС и ИН в широком возрастном диапазоне [3], что можно связать с меньшей выборкой подростков с нарушениями развития и их возрастными особенностями. В дальнейшем, планируется увеличение выборки и более подробный акустический анализ.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект 25-15-00139).

Список литературы

1 *Patel S.P., Nayar K., Martin G.E., Franich K., Crawford S., Diehl J.J., Losh M.* An Acoustic Characterization of Prosodic Differences in Autism Spectrum Disorder and First-Degree Relatives. // Journal of autism and developmental disorders. 2020. **50, N** 8. P. 3032.

2 *Lyakso E., Frolova O., Nikolaev A.* Voice and speech features as diagnostic symptom. // Pracana C., Wang M. (Eds.) Psychological Applications and Trends 2021. InScience Press. 2021. P. 259.

3 *Pereira C.M.G., Faria S.M. de M.* Do you Feel what I Feel? Emotional Development in Children with ID. // Procedia – Social and Behavioral Sciences. 2015. **165**. P. 52.

4 *Lyakso E., Frolova O., Nikolaev A., Grechanyi S., Matveev A., Matveev Y., Makhnytkina O., Nersisson R.* Emotional State of Children with ASD and Intellectual Disabilities: Perceptual Experiment and Automatic Recognition by Video, Audio and Text Modalities. // LNAI. 2023. **14338**. P. 525.

5 *Ляксо Е.Е., Фролова О.В., Гречаный С.В., Филатова Ю.О., Куражова А.В., Николаев А.С., Клешнев Е.А*. Методика оценки эмоционального развития детей: Child Emotion Development Method — CEDM. // Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений. Санкт-Петербург. 2025.

УДК 534.784; 612.85 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39700

Акустические и перцептивные характеристики речи детей с синдромом дефицита внимания и расстройствами аутистического спектра: сравнительный анализ

Е.Е. Ляксо [1,a], **О.В. Фролова** [1,b]

[1] *Санкт-Петербургский государственный университет, Биологический факультет, кафедра ВНД и психофизиологии, группа по изучению детской речи, Санкт-Петербург, 199034, Университетская наб. 7-9*

e-mail: [a]*lyakso@gmail.com,* [b]*olchel@yandex.ru*

Аннотация: Синдром дефицита внимания с гиперактивностью (СДВГ) относится к группе гиперкинетических расстройств, часто сопровождается коморбидностью с расстройствами аутистического спектра (РАС), что приводит к сложностям в диагностике заболеваний. Настоящее исследование направлено на выявление акустических и перцептивных характеристик речи детей СДВГ, СДВГ+РАС и РАС, которые могли бы служить дополнительными маркерами заболеваний. С этой целью осуществлена запись речи детей в возрасте 5-13 лет при выполнении тестовых заданий методики CEDM, проведен спектрографический и перцептивный анализ. Выявлены различия в значениях разности между двумя первыми формантами [F2-F1], значениях третьей форманты [F3] ударных гласных в словах, значениях индекса артикуляции гласных (ИАГ) между детьми трех анализируемых групп. Показано влияние возраста детей на акустические характеристики их речи. На основе перцептивного эксперимента по результатам экспертного анализа проведено сравнение четкости артикуляции, разборчивости речи и интонационных характеристик (нормальная интонация или абнормальная) детей с СДВГ, СДВГ+РАС и РАС. Обсуждаются перспективы изучения лингвистических характеристик речи детей.

Ключевые слова: акустические характеристики, перцептивный эксперимент, речь, дети с синдромом дефицита внимания и гиперактивностью

PACS: 43.70.+i; 43.71.+m

Acoustic and perceptual characteristics of speech in children with attention deficit disorder and autism spectrum disorders: a comparative analysis

E.E. Lyakso[1,a], **O.V. Frolova** [1,b]

[1]*Child speech research group, Department of Higher nervous activity and Psychophysiology, Biology Faculty, Saint-Petersburg state university, Saint Petersburg, 1999034, Russia*
e-mail: [a]lyakso@gmail.com, [b]olchel@yandex.ru

Abstract: Attention deficit/hyperactivity disorder (ADHD) belongs to a group of hyperkinetic disorders, often accompanied by comorbidity with autism spectrum disorders (ASD), which leads to difficulties in diagnosis of diseases. This study aims to identify the acoustic and perceptual characteristics of speech in children with ADHD, ADHD + ASD and ASD, which could serve as additional markers of diseases. For this purpose, the speech of children aged 5-13 years was recorded while performing test tasks of the CEDM method. Spectrographic and perceptual analysis was carried out. Differences in the values of [F2-F1], the values of the third formant [F3] of stressed vowels in words, the values of the vowel articulation index (VAI) between children of the analyzed groups were revealed. The influence of the children's age on the acoustic features of their speech is shown. A comparison of articulation clarity, speech intelligibility and intonation characteristics (normal or abnormal intonation) was conducted in children with ADHD, ADHD+ASD and ASD based on perceptual analysis. Prospects for studying the linguistic characteristics of children's speech are discussed.

Keywords: acoustic features, perceptual experiment, speech, children with attention deficit hyperactivity disorder

PACS: 43.70.+i; 43.71.+m

1 Введение

Синдром дефицита внимания с гиперактивностью (СДВГ) относится к группе гиперкинетических расстройств. Отличительной клинической особенностью детей и взрослых с СДВГ является коморбидность с другими расстройствами развития [1], при высокой коморбидности с расстройствами аутистического спектра (РАС) [2], что приводит к сложностям в диагностике заболеваний. Дети с СДВГ чаще испытывают речевые и языковые проблемы, чем их сверстники без СДВГ. Указывают на прагматические, семантические языковые расстройства, фонетико-фонологические нарушения [3], особенности голоса [4]. Дети с СДВГ более разговорчивы [5] и чаще говорят быстрее, имеют более громкий и хриплый голос [4], чем их сверстники с типичным развитием. Работы, направленные на изучение акустики речи детей с СДВГ немногочисленны [6], особенно на материале русского языка [7].

Коморбидность СДВГ с РАС привносит специфические особенности в характеристики голоса и речи детей.

Исследование направлено на выявление акустических и перцептивных характеристик речи детей СДВГ и СДВГ+РАС, которые могли бы служить маркерами заболеваний.

2 Методика

Участники исследования - 40 детей в возрасте 5-13 лет, отнесенные на основании диагноза в группы по 10 детей: с СДВГ, СДВ+РАС и две контрольные группы - РАС и типичное развитие (ТР). Запись речи проведена при выполнении детьми тестового задания по методике Оценки Эмоционального Развития Детей (Child Emotion Development Method - CEDM) [8] - «ролевая игра» [9]. Запись речи произведена на магнитофон «Marantz PMD660» с выносным микрофоном «SENNHEIZER e835S». Речевые файлы сохраняли в формате Windows PCM WAV, 48000 Гц, 16 бит. Спектрографический анализ речи детей проведен в звуковом редакторе «Cool Edit Pro» с определением значений частоты основного тона (ЧОТ, F0), значений формант и длительности ударных гласных в словах. Считали индекс артикуляции гласных (ИАГ) в словах.

Перцептивный эксперимент проведен с целью определения взрослыми четкости артикуляции, разборчивости речи и интонации (типичная / нетипичная) детей. Слушателями явились 5 врачей-психиатров (стаж работы - 23.8 ± 9.2 лет).

3 Результаты

Выявлены значимые различия по критерию Манна Уитни ($p < 0.05$) между детьми разных групп по значениям ЧОТ, значениям разности между формантами [F2-F1], значениям третьей форманты и длительности гласных в словах (табл.1). Максимальные значения ЧОТ определены для детей с СДВГ+РАС, что отражает коморбидность заболевания.

Таблица 1

Различия акустических характеристик речи детей разных групп, критерий Манна-Уитни ($p<0.05$)

Характеристика	**Сравниваемые группы**	**Z**	**p-level**	**r**
F0 – высказывания/слова	СДВГ+ РАС/ ТР	9.873	0.000001	0.501
	РАС/ТР	7.005	0.0000001	0.334
F0 –гласный	СДВГ+РАС/ТР	9.970	0.0000001	0.396
	РАС/ ТР	8.874	0.0000001	0.336
F0 - стац. уч. гласного	СДВГ+РАС/ТР	9.969	0.0000001	0.396
	РАС/ ТР	8.969	0.0000001	0.339
[F2-F1]	СДВГ /ТР	-9.496	0.0000001	-0.360
	СДВГ+РАС / ТР	-5.218	0.0000001	-0.207
	СДВГ / СДВГ+РАС	-3.629	0.0002851	-0.163
	СДВГ / РАС	-9.626	0.0000001	-0.410
	СДВГ/ТР	-14.617	0.001	-0.576

F3	СДВГ / СДВГ+РАС	-8.629	0.0000001	-0.406
	СДВГ / РАС	-15.571	0.001	-0.690
	СДВГ+РАС / ТР	-5.689	0.0000001	-0.229
	СДВГ+РАС / РАС	-8.175	0.0000001	-0.372
	РАС / ТР	4.270	0.000020	0.165
Длительность-гласный	СДВГ+РАС / ТР	8.046	0.0000001	0.319
	СДВГ /ТР	10.396	0.0000001	0.393

Диапазон значений [F2 - F1] ударных гласных минимален (786 ± 686 Гц, среднее ± стандартное отклонение) у детей с СДВГ и максимален у детей с РАС (1245 ± 853 Гц). У детей с СДВГ диапазон значений [F2 - F1] отличается ($p<0,0001$) от соответствующих характеристик детей с типичным развитием, СДВГ+РАС и РАС. Наиболее высокие значения ИАГ выявлены для детей с СДВГ (ИАГ=1,0). Значения третьей форманты (F3) у детей с СДВГ значимо ниже, по сравнению со значениями F3 у детей других групп. Максимальные значения F3 – у детей с РАС.

Влияние возраста проявляется в более высоких значениях ЧОТ у ТР детей, детей с СДВГ и СДВГ+РАС, в высоких значениях диапазона [F2-F1] у детей с СДВГ и в большей длительности ударных гласных в словах у детей с РАС в раннем возрасте (5-7 лет) (табл. 2).

Таблица 2

Влияние возраста детей на акустические характеристики их речи (Регрессионный анализ)

Группы	**Характеристики**	**p**	**R^2**	**β**
ТР	F0 высказываний/слов F(1, 193) = 9.74	.002	.048	-.219
	F0 гласных F(1, 415) = 13.56	.0002	.316	-.178
	F0 стац.уч.гласных F(1, 415) = 17.37	.00001	.040	-.200
	F1 F(1, 415) = 37.31	.00001	.082	-.287
	F2 F(1, 415) = 17.60	.00001	.407	-.202
	Длительность гласных F(1, 415) = 29.01	.00001	.065	-.256
СДВГ	F0 высказываний/слов F(1, 223) =59.72	.00001	.211	-.460
	F0 гласных F(1, 280) = 53.47	.00001	.160	-.400
	F0 стац.уч.гласных F(1, 279) = 49.61	.00001	.151	-.389
	F1 F(1, 279) = 7.95	.005	.028	-.166
	F2 F(1, 279) = 7.24	.007	.025	-.159
РАС	Длительность гласных F(1, 282) = 6.470	.01	.022	-.328
СДВГ+ РАС	F0 высказываний/ слов F(1, 192) = 30.78	.0001	.138	-.372
	F0 гласных F(1, 216) = 21.34	.000001	.090	-.300
	F0 стац.уч.гласных F(1, 216) = 18.91	.000001	.080	-.284

стац.уч.гласных – стационарный участок гласных

На основании перцептивного анализа показано, что речь детей с СДВГ по интонации и разборчивости значимо не отличается от речи ТР детей (табл. 3). Артикуляция определяется

врачами–психиатрами равновероятно как четкая и нечеткая. Артикуляция детей с РАС и СДВГ+РАС преимущественно нечеткая, речь неразборчива. Интонацию речи детей с РАС врачи определили как атипичную (56% ответов) и типичную (44% ответов).

Таблица 3

Характеристики речи детей по оценке врачей – психиатров (количество ответов, %)

Группа детей	Характеристики речи					
	артикуляция		речь		интонация	
	четкая	нечеткая	разборчива	неразборчива	типичная	атипичная
СДВГ	**50**	50	**68**	32	**86**	14
СДВГ+РАС	24	**76**	44	**56**	**58**	42
РАС	28	**72**	42	**52**	44	**56**
ТР	**61**	39	**77**	23	**92**	8

4 Заключение

Выявлены особенности акустических и перцептивных характеристик речи детей с СДВГ и СДВГ+РАС. Акустические характеристики речи детей с СДВГ связаны с артикуляционными особенностями (низкими значениями: разности между двумя первыми формантами, третьей форманты), что, по-видимому, нашло отражение в оценках слушателей - врачей-психиатров, определивших артикуляцию равновероятно как четкую и нечеткую. Речь детей с СДВГ+РАС отличается от речи детей с СДВГ высокими значениями ЧОТ, значениями третьей форманты, низкими значениями ИАГ. По перцептивным характеристикам отличия выявлены по показателям артикуляции и разборчивости речи. Используемые в качестве контроля акустические и перцептивные характеристики речи ТР детей и детей с РАС подчеркнули выявленные различия. Полученные данные показали, что по акустическим характеристикам речи и по ее восприятию слушающими речь детей с СДВГ мало отличается от речи ТР сверстников, но по большему числу акустических и перцептивных характеристик от речи детей с СДВГ+РАС. Для оценки сформированности разных уровней речи необходимо провести лингвистический анализ и увеличить выборку детей с СДВГ. В тоже время, полученные данные можно рассматривать в качестве первых шагов по пути выявления речевых маркеров СДВГ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (проект № 25-15-00139).

Список литературы

1. *Leffa D.T., Caye A., Rohde, L.A.* ADHD in Children and Adults: Diagnosis and Prognosis. // Curr. Top. Behav. Neurosci. 2022. 57. P. 1.
2. *Antshel K.M., Russo N.* Autism Spectrum Disorders and ADHD: Overlapping

Phenomenology, Diagnostic Issues, and Treatment Considerations. // Curr. Psychiatry Rep. 2019. 21. P.34

3. *Vaquerizo-Madrid J., Estévez-Díaz F., Díaz-Maíllo I.* A review of the alert and psycholinguistic intervention model in attention deficit hyperactivity disorder. // Rev. Neurol. 2006. 42. S53-61
4. *Garcia-Real T., Diaz-Roman T.M., Garcia-Martinez V., Vieiro-Iglesias P*. Clinical and acoustic vocal profile in children with attention deficit hyperactivity disorder. // J. Voice. 2013. 27. P.787 *Congologlu M.A., Turkbay T., Ciyiltepe M., Durukan I., Dogangun B. Yuce M.* Immediate Effects of Methylphenidate on Vocal Acoustic Parameters in Children with Attention Deficit Hyperactivity Disorder. // Bull. Clin. Psychopharmacol. 2009. 19. P. 365.
5. *Hamdan A.L., Deeb R., Sibai A., Rameh, C., Rifai H., Fayyad J.* Vocal characteristics in children with attention deficit hyperactivity disorder. // J Voice. 2009. **23,** N 2. P. 190.
6. *Lyakso E., Frolova O., Lebedev A., Shabanov P., Grechanyi S., Atamanova E., Kovelenova M., Limarenko V.* Behavior and Speech Features of Children with ADHD. // Healthcare. 2026. **14,** N. 814. P.1.
7. *Lyakso E., Frolova O., Kleshnev E., Ruban N., Mekala A.M., Arulalan K. V.* Approbation of the Child's Emotional Development Method (CEDM) // ACM International Conference Proceeding Series. 2022. P. 201.
8. *Фролова О.В., Клешнев Е.А., Григорьев А.С., Филатова Ю.О., Лаксо Е.Е.* Оценка эмоциональной сферы детей с типичным развитием и расстройствами аутистического спектра на основании междисциплинарного подхода. // Физиология человека. 2023. **49**, N. 3. С. 13.

УДК 534.784; 612.85 DOI 10.34756/GEOS.2026.17.39701

Характеристики речи детей с синдромом дефицита внимания и гиперактивности и интеллектуальными нарушениями

О.В. Фролова [1,a], **Е.Е. Ляксо** [1,b]

[1] *Санкт-Петербургский государственный университет, Биологический факультет, кафедра ВНД и психофизиологии, группа по изучению детской речи, Санкт-Петербург, 199034, Университетская наб. 7-9*

e-mail: [a]olchel@yandex.ru, [b]lyakso@gmail.com

Аннотация: Цель исследования – изучение перцептивных и акустических характеристик речи детей с диагнозом синдром дефицита внимания с гиперактивностью в сочетании с интеллектуальными нарушениями лёгкой степени тяжести (СДВГ+ИН). Проведена аудио запись, перцептивный и спектрографический анализ речи детей 5-13 лет с СДВГ+ИН и их сверстников с ИН при выполнении тестовых заданий Методики оценки эмоционального развития детей – CEDM: диалог с экспериментатором, ролевая игра, ответы на вопросы по картинкам. Описана возрастная динамика перцептивных (разборчивость речи) и акустических характеристик речи детей двух групп. Выявлены различия в значениях частоты основного тона высказываний и ударных гласных в словах между группами детей с СДВГ+ИН и ИН. Данные, полученные в исследовании, обсуждаются с результатами анализа речи детей с типичным развитием и СДВГ.

Ключевые слова: акустические характеристики речи, перцептивные характеристики речи, дети, синдром дефицита внимания с гиперактивностью, интеллектуальные нарушения.

PACS: 43.70.+i; 43.71.+m

Speech features of children with attention deficit hyperactivity disorder and intellectual disabilities

O.V. Frolova [1,a], **E.E. Lyakso**[1,b]

[1]*Child speech research group, Department of Higher nervous activity and Psychophysiology, Biology Faculty, Saint-Petersburg state university, Saint Petersburg, 1999034, Russia*

e-mail: [a]olchel@yandex.ru, [b]lyakso@gmail.com

Abstract: The aim of the study was to explore the perceptual and acoustic characteristics of speech in children with attention deficit hyperactivity disorder and mild intellectual disability

(ADHD+ID). We conducted audio recordings, perceptual, and spectrographic analyses of the speech of children aged 5-13 years with ADHD+ID and their peers with ID while completing test tasks of the Child Emotional Development Model (CEDM): dialogue with an experimenter, «co-op play», and pictures description. The age dynamics of perceptual (speech intelligibility) and acoustic features of speech in children from two groups is described. Differences in the pitch values of utterances and stressed vowels in words were revealed between the groups of children with ADHD+ID and ID. The data obtained in the study are discussed with the results of the analysis of speech in children with typical development and ADHD.

Keywords: acoustic features of speech, perceptual characteristics of speech, children, attention deficit hyperactivity disorder, intellectual disabilities.

PACS: 43.70.+i; 43.71.+m

1 Введение

Синдром дефицита внимания с гиперактивностью (СДВГ) – широко распространённое нарушение развития, которое в большинстве случаев впервые диагностируется в детстве, симптомы СДВГ могут сохраняться в зрелом возрасте [1, 2]. Симптоматика СДВГ проявляется у значительного количества людей с интеллектуальными нарушениями (ИН) [3, 4]. В настоящее время на материале русского языка проводятся исследования, направленные на выявление специфических акустических характеристик голоса и речи детей с нарушениями развития и атипичным развитием: расстройствами аутистического спектра, синдромом Дауна, интеллектуальными нарушениями [5], СДВГ [6]. Показано, что речь детей с интеллектуальными нарушениями характеризуется высокими значениями частоты основного тона, длительности гласных, нечёткой артикуляцией [5]. Исследования акустических характеристик речи русскоязычных детей с СДВГ и сочетанными нарушениями – СДВГ и ИН единичны [6].

Цель данного исследования – изучение перцептивных и акустических характеристик речи детей с диагнозом синдром дефицита внимания с гиперактивностью в сочетании с интеллектуальными нарушениями лёгкой степени тяжести.

2 Методика

В исследовании приняли участие дети 5-13 лет: 16 детей с диагнозом СДВГ и интеллектуальными нарушениями (группа СДВГ+ИН) и 23 ребенка с интеллектуальными нарушениями (контрольная группа, ИН). Все дети протестированы по Методике оценки эмоционального развития детей (Child Emotion Development Method - CEDM) [7]. Запись речи детей при выполнении тестовых заданий - диалог с экспериментатором, ролевая игра, ответы

на вопросы по картинкам - произведена на магнитофон «Marantz PMD660» с выносным микрофоном «SENNHEIZER e835S».

Проведен перцептивный эксперимент, направленный на оценку аудиторами - врачами-психиатрами (n=5, опыт работы 23.8±9.2 лет) и студентами первого курса ординатуры, специализирующимися в области психиатрии, чёткости артикуляции, разборчивости речи и особенностей интонации (типичная/атипичная) детей с СДВГ+ИН и ИН. Врачи и ординаторы прослушивали в условиях свободного поля высказывания детей, организованные в тестовые последовательности, и заполняли разработанные анкеты.

Спектрографический анализ речи детей проведен в звуковом редакторе «Cool Edit Pro». Определяли значения частоты основного тона (ЧОТ, F0) высказываний, ударных гласных в словах, стационарных участков ударных гласных, значения первых трёх формант (F1, F2, F3) ударных гласных /а/, /и/, /у/, длительность ударных гласных в словах. Считали индекс артикуляции гласных (ИАГ) в словах [8].

3 Результаты

3.1 Перцептивные характеристики речи детей с СДВГ+ИН и ИН

Анализ ответов аудиторов в перцептивном эксперименте показал, что высказывания детей с СДВГ+ИН характеризуются нечёткой артикуляцией (66% ответов врачей и 69% ответов ординаторов). Ординаторы чаще, чем врачи, указывали, что речь детей с СДВГ+ИН разборчива (49% ответов врачей и 55 % ответов ординаторов), интонация, с которой дети произносят высказывания – типична (61% ответов врачей и 85% ответов ординаторов).

Разборчивость речи детей с ИН незначительно выше, чем разборчивость речи детей с СДВГ+ИН (52% ответов врачей и 61 % ответов ординаторов), большая часть высказываний произносится детьми с ИН с типичной интонацией (67% ответов врачей и 89 % ответов ординаторов) (рис. 1).

На основании анализа ответов аудиторов не выявлено повышения чёткости артикуляции и разборчивости речи с возрастом детей.

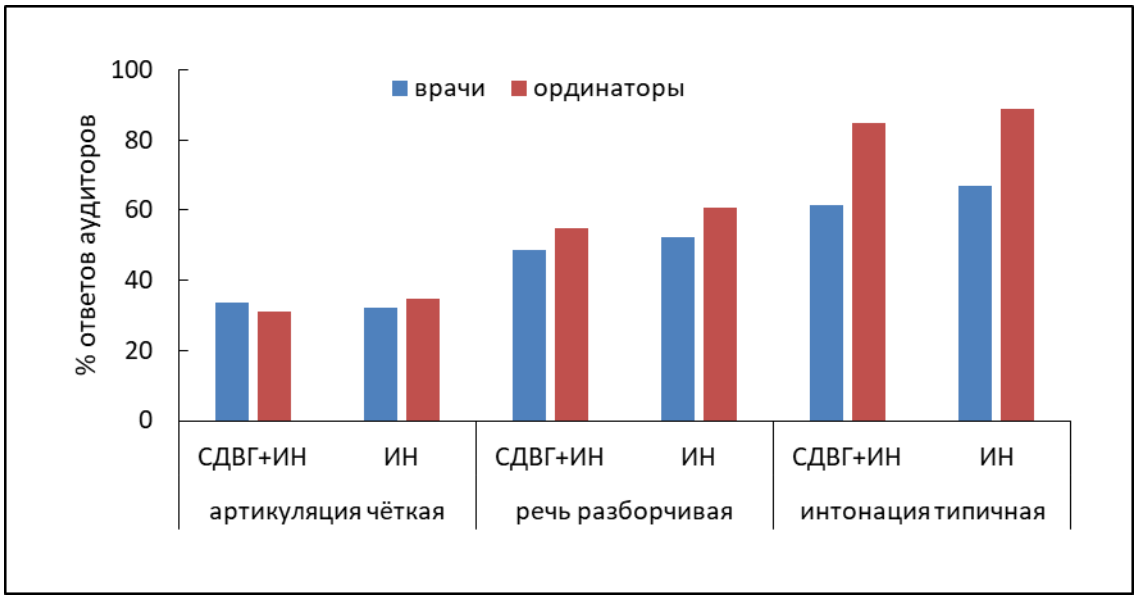


Рисунок 1. Перцептивные характеристики речи детей с СДВГ+ИН и ИН, % ответов аудиторов

3.2 Акустические характеристики речи детей с СДВГ+ИН и ИН

Значения частоты основного тона высказываний, ударных гласных, стационарных участков ударных гласных в словах детей группы СДВГ+ИН выше ($p < 0.05$, критерий Манна-Уитни), чем соответствующие значения ЧОТ детей группы ИН (табл. 1).

Таблица 1

Различия между группами детей СДВГ+ИН и ИН по значениям частоты основного тона, критерий Манна-Уитни ($p < 0.05$)

Характеристика	**Z**	**p-level**	**r**
F0 –высказывания/слова	2.158	0.030947	0.096
F0 – ударный гласный	2.972	0.002960	0.121
F0 –стационарный участок ударного гласного	2.451	0.014250	0.100

Значения ИАГ детей группы СДВГ+ИН (0.87) ниже, чем значения ИАГ детей с ИН (0.9).

В группе СДВГ+ИН не выявлено зависимости ЧОТ от возраста детей. Показано, значения второй и третьей форманты ударных гласных в словах детей с СДВГ+ИН старшего возраста (8-13 лет) ниже, чем соответствующие параметры гласных в словах детей с СДВГ+ИН младшего возраста (5-7 лет) (табл. 2). С увеличением возраста детей с ИН снижаются значения ЧОТ высказываний, ударных гласных, стационарных участков ударных гласных, значения второй форманты ударных гласных в словах (табл. 2).

Таблица 2

Влияние возраста детей на акустические характеристики их речи – Регрессионный анализ

Группы	**Характеристики**		**p**	**R^2**	**β**
СДВГ+ИН	F2	F(1, 299) = 4.41	0.03	0.121	-0.121
	F3	F(1 ,279) = 9.51	0.002	0.033	-0.182
ИН	F0 высказываний	F(1, 222) = 12.99	0.00001	0.055	-0.235
	F0 гласных	F(1, 300) = 30.78	0.00001	0.093	-0.305
	F0 стац. уч. гласных	F(1, 299) = 122.88	0.00001	0.071	-0.267
	F2	F(1, 299) = 6.75	0.009	0.022	0.149

стац. уч. гласных – стационарный участок гласных

4 Заключение

В исследовании получены данные о специфике перцептивных и акустических характеристик речи детей 5-13 лет с СДВГ и интеллектуальными нарушениями, в качестве контрольной группы выбраны дети с интеллектуальными нарушениями. На основании перцептивного анализа показано, что для детей с СДВГ+ИН, также, как и для детей с ИН, характерна низкая разборчивость речи, нечёткая артикуляция; интонация детей с СДВГ+ИН и ИН описывается аудиторами в большинстве случаев как типичная. По оценке аудиторов с возрастом чёткость артикуляции и разборчивость речи детей с СДВГ+ИН и ИН значимо не меняется.

Выявлены различия между группами детей СДВГ+ИН и ИН по значениям частоты основного тона высказываний, ударных гласных и стационарных участков ударных гласных в словах. Возрастная динамика акустических характеристик речи в группе детей с СДВГ+ИН проявляется в снижении значений второй и третьей форманты с увеличением возраста детей, в группе детей с ИН – в снижении значений частоты основного тона и значений второй форманты.

В перспективе с увеличением выборки детей и при сравнении характеристик речи детей с СДВГ и ИН с характеристиками речи детей с типичным развитием и СДВГ без сопутствующих нарушений акустические и перцептивные характеристики речи могут рассматриваться в качестве дополнительных диагностических критериев СДВГ у детей с интеллектуальными нарушениями.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (проект № 25-15-00139).

Список литературы

1. *Salari N., Ghasemi H., Abdoli N., Rahmani A., Shiri M.H., Hashemian A.H., Akbari H., Mohammadi M.* The global prevalence of ADHD in children and adolescents: a systematic review and meta-analysis. // Ital J Pediatr. 2023. **49**, N 1: 48. P.1.
2. *Popit S., Serod K., Locatelli I., Stuhec M.* Prevalence of attention-deficit hyperactivity disorder (ADHD): systematic review and meta-analysis. // Eur Psychiatry. 2024. **67**, N 1: e68.
3. *Deutsch C.K., Dube W.V., McIlvane W.J.* Attention deficits, Attention-Deficit Hyperactivity Disorder, and intellectual disabilities. // Dev Disabil Res Rev. 2008. **14**, N 4. P. 285.
4. *Thomson A., Maltezos S., Paliokosta E., Xenitidis K.* Amfetamine for attention deficit hyperactivity disorder in people with intellectual disabilities. // Cochrane Database Syst Rev. 2009. **1**: CD007009.
5. *Ляксо Е. Е., Фролова О. В., Гречаный С. В., Матвеев Ю. Н., Верхоляк О., Карпов, А. А.* Голосовой портрет ребёнка с типичным и атипичным развитием. Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений. СПб., 2020.
6. *Lyakso E., Frolova O., Matveev A., Shabanov P., Lebedev A., Nikolaev A., Kleshnev E., Grechanyi S., Nersisson R.* Attention Deficit Hyperactivity Disorder: Identifying Approaches for Early Diagnosis, a Pilot Study. // Lecture Notes in Computer Science. 2026. **16187**. P. 188.
7. *Lyakso E., Frolova O., Kleshnev E., Ruban N., Mekala A.M., Arulalan K. V.* Approbation of the Child's Emotional Development Method (CEDM) // ACM International Conference Proceeding Series. 2022. P. 201.
8. *Roy N., Nissen S.L., Dromey C., Sapir S.* Articulatory changes in muscle tension dysphonia: Evidence of vowel space expansion following manual circumlaryngeal therapy. // J Commun Disord. 2009. **42**, N 2. P. 124.

УДК: 004.4; 376.3; 612.85 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39702

Речевое поведение школьников 6-9 классов со слухоречевыми нарушениями в процессе диалогического общения с педагогом-дефектологом

Столярова Э.И.[1,a], Белова Н.Ю.[2,b], Солнушкин С.Д.[1,c], Чихман В.Н.[1,d]

[1] ФГБУН Институт физиологии им. И.П. Павлова РАН, Санкт-Петербург, Россия

[2] ГБОУ Школа № 10 Калининского района СПб, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: [a]elvirast74@gmail.com, [b]belova_natasha09@mail.ru,

[c]solnushkin@list.ru, [d]chikhmanvn@infran.ru

В работе приводится описание диалогов школьников с учителем-дефектологом и результаты их анализа. В группы для корректирующих занятий входили школьники с отставанием в освоении устной и письменной речи: 5 школьников 6 класса, 11-8 класса и 4-9 класса. Темой разговора служило обсуждение смысла представленных пословиц. Во время беседы производилась запись звукового речевого материала и его сохранение в цифровом виде для последующего прослушивания и проведения инструментальных измерений. В процессе анализа оценивались следующие показатели диалога: продолжительность (число минимальных диалоговых единиц и время), длительность пауз между инициирующей репликой педагога и ответной репликой школьника, количество побудительных и поощрительных реплик педагога. В ответных репликах определяли фразовую структуру, количество ошибок фонетического, лексического и грамматического плана, наличие пауз, интонационные характеристики. Полученные индивидуальные показатели дополняют представления об уровне освоения слухоречевых навыков, объективная характеристика которых содержится в диагностических таблицах школьников и показателях выполнения тестов из программных комплексов «Учись слушать» и «Помощник логопеда-дефектолога». Представляемая работа осуществлена в рамках договора о научно - практическом сотрудничестве между ИФ РАН и ГБОУ Школа №10 «Изучение специфики проблем письма и чтения у школьников с речевыми нарушениями и развитие подходов к их коррекции».

Ключевые слова: слух, речь, слухоречевые нарушения, диалог, информационные технологии

PACS: 43.58 Kr; 43.70.+i; 43.71.+m

УДК: 004.4; 376.3; 612.85; 81 DOI: DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39702
PACS: 43.58 Kr; 43.70.+i; 43.71.+m

Речевое поведение школьников 5-8 классов со слухоречевыми нарушениями в процессе диалогического общения с педагогом-дефектологом

Столярова Э.И.[1,a], Белова Н.Ю.[2,b], Солнушкин С.Д.[1,c], Чихман В.Н.[1,d]

[1] *ФГБУН Институт физиологии им. И.П. Павлова РАН, Санкт-Петербург, Россия*

[2] *ГБОУ Школа № 10 Калининского района СПб, Санкт-Петербург, Россия*

E-mail: [a]elvirast74@gmail.com, [b]belova_natasha09@mail.ru,

[c]solnushkin@list.ru, [d]chikhmanvn@infran.ru

В работе приводится описание диалогов между учителем-дефектологом и школьниками 5-8-х классов с отставанием в освоении устной и письменной речи. Темой разговора служило обсуждение смысла представленных пословиц. Во время беседы производилась запись звукового речевого материала и его сохранение в цифровом виде для последующего прослушивания и проведения инструментальных измерений. В процессе анализа оценивались следующие показатели диалога: продолжительность (число минимальных диалоговых единиц и время); длительность пауз между инициирующей репликой педагога и ответной репликой школьника; количество побудительных и поощрительных реплик педагога. В ответных репликах определяли: фразовую структуру; количество ошибок фонетического, лексического и грамматического плана; наличие пауз, интонационные характеристики. Полученные индивидуальные показатели дополняют представления об уровне освоения слухоречевых и языковых навыков, объективная характеристика которых содержится в диагностических таблицах школьников и показателях выполнения тестов из программных комплексов «Учись слушать» и «Помощник логопеда-дефектолога». Представляемая работа осуществлена в рамках договора о научно-практическом сотрудничестве между ИФ РАН и ГБОУ Школа №10 «Изучение специфики проблем письма и чтения у школьников с речевыми нарушениями и развитие подходов к их коррекции».

Ключевые слова: речевое поведение, школьники с нарушениями речи, диалог с учителем-дефектологом, слухоречевые и языковые навыки

PACS: 43.58 Kr; 43.70.+i; 43.71.+m

Speech behavior of schoolchildren in grades 5-8th with auditory-speech disorders under dialogical communication with a speech therapist

Stolyarova E.I.[1,a], Belova N.Yu.[2,b], Solnushkin S.D.[1,c], Chikhman V.N.[1,d]

[1] Pavlov Institute of Physiology of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia

[2] School No.10 of Kalininsky District of Saint Petersburg, Saint Petersburg, Russia

E-mail: [a]elvirast74@gmail.com, [b]belova_natasha09@mail.ru, [c]solnushkin@list.ru, [d]chikhmanvn@infran.ru

The paper describes dialogues between a speech therapist and schoolchildren in grades 5-8 who had problem with developing of spoken and written language. The communication focused on discussing the meaning of the presented proverbs. Digital audio recordings of dialogues were made for later playback and instrumental analysis. Following indicators of the dialogical communication were evaluated: the number of minimal dialogue units and the time of dialogue; the duration of pauses between the teacher's initiating remark and the children's response; the number of the teacher's encouraging and motivating remarks. In the children's responses, the phrase structure, presence of pauses and intonation characteristics were assessed along with the number of phonetic, lexical, and grammatical errors fixation. The obtained individual data add to understanding of the level of development of auditory and speech skills, the objective characteristics of which are presented in the diagnostic tables and in results of testing with the help of the "Learn to Listening" and "Speech Therapist Assistant" programs. The work was carried out under the scientific and practical cooperation between the IF RAS and School No.10 on "The study of the reading and writing problems in schoolchildren with speech disorders and the development of their correction means".

Keywords: speech behavior, schoolchildren with auditory and speech disorders, dialogue with speech therapist, auditory and speech skills

Введение

В практике проведения коррекционных занятий общение педагога-дефектолога со школьниками часто проходит в форме диалогов, в ходе которых учитель, задавая вопросы на определенную тему, по ответам ученика может судить о степени освоения материала и спланировать дальнейшие занятия. В работах [1, 2] приведены примеры использования учебных диалогов в процессе коррекционных занятий по оценке чтения и понимания текстов школьниками 5-х и 9-х классов со слухоречевыми нарушениями. При этом отмечалось, что участие школьников в диалоге позволяет оценить, помимо речевой компетенции, уровень

языкового, когнитивного и коммуникативного развития школьников. В представленной работе содержится описание и анализ диалогов между школьниками 5-8 классов и учителем-дефектологом на тему*:* разговор о смысле пословиц. («Без труда не вытащишь и рыбку из пруда», «Делу – время, потехе – час», «Каковы дела, такова и слава» и т.д.). Диалог включал в себя вопросные реплики учителя и ответные реплики ученика по конкретной теме пословиц, а также ответы на рекомендованные вопросы общего характера, прилагаемые к пословице в методическом руководстве [3].

В докладе представлены результаты изучения содержания диалогов и характерных особенностей речи школьников в ситуации диалогического взаимодействия с педагогом-дефектологом.

Состав групп для занятий с дефектологом: 5 школьников 5 класса (1 девочка и 4 мальчика; средний возраст 12 лет); 3 - 7 классов (1 девочка и 2 мальчика; средний возраст; 13.5 лет); 6 – 8 класса (2 девочки и 4 мальчика; средний возраст 15 лет). Для всех учащихся педагогом-дефектологом были оформлены логопедические характеристики и диагностические таблицы речевых нарушений, в которые входили оценки экспрессивной, импрессивной и письменной речи по разным параметрам. Согласно педагогическим характеристикам, у школьников в той или иной степени отмечалась несформированность фонематического восприятия и слуха; лексико-грамматическое недоразвитие речи; дисграфия; дизорфография; ограниченность словарного запаса; недостаточное освоение навыков языкового анализа; они также испытывали трудности при составлении устного рассказа. По результатам выполнения различных заданий в ходе проведения корректирующих занятий для каждого ученика оценивался уровень освоения слухоречевых навыков по традиционным методикам [1, 2] и с использованием программных комплексов «Учись слушать» и «Помощник логопеда-дефектолога»» [4, 5].

Описание и анализ диалогов

Диалог проходил в спокойной, конструктивной и доброжелательной атмосфере. Педагог поддерживал включенность школьника в диалог путем использования побудительных («а как ты думаешь?», «еще…» и т.д.) и поощрительных («так», «хорошо», одобрительными возгласами «ага» и т.д.) реплик; эмоциональным интонированием своей речи. Школьники при общении вели себя достаточно свободно и откровенно отвечали на вопросы общего характера.

Примеры фрагментов диалогов

1.П*: - Скажи пожалуйста, как ты понимаешь пословицу: «делу - время, потехе - час»*
ШФ: - Я понимаю так… то что...это означает, что сначала дело сделай то, что нужно, а потом то, что … то, что…ты хочешь. (5 кл., мальчик).

ШБ: - Нуу… Она означает, что…нужно делать все вО'время (8кл., девочка).

2.П: - *Какие ты знаешь пословицы о труде?*
ШБ: - Нуу… о труде я знаю, что ... всегда нужен труд (8кл., девочка)

3.П: - *А как ты проводишь свое свободное время?*
ШО: - Лежа^...Телек. (*Лёжа? Телек смотришь?)* Да. (5кл, мальчик)
ШФ: - Сижу… Просто сижу в телефоне (5кл., мальчик)
ШК: - Никак. Я просто отдыхаю и все (8 кл., девочка)

4.П*:* - *Какие дела ты делаешь с радостью?*
ШТ: - Я с радостью де... занимаюсь спортом, ну там иногда с трудом...спортом, а так..с радостью, а уроки делаю в основном с трудом, но иногда с радостью. Уроки делаю быстро. Чи… Читаю нормально, оценки хорошие. (5кл., мальчик)

5. П: - *Что будет, если врачи будут работать спустя рукава?*
ШЛ: - Первое. Пациенты будут не…здоровыми. Вот не очень здоровыми, тем более операции будут очень смертельными, потому что всегда риск будет большой. (5кл., мальчик)

6.П: - *А какую работу ты делаешь с удовольствием, а какую с неудовольствием?*
ШЗ: - С удовольствием… я…маме помогаю готовить еду, пылесосить, мыть полы и посуду мыть. Мне лень делать – выкидывать мусор (7кл., мальчик)

7.П: - *А Скажи, какую работу ты делаешь с удовольствием, а какую – спустя рукава?*
ШТ: - С удовольствием я делаю всю работу, потому что я понимаю, что даже если я ее спустя рукава сделаю, то мне поставят ниже оценку, чем если я ее сделаю не спустя рукава. (7кл., мальчик)

В процессе беседы производилась запись звукового речевого материала и его сохранение в цифровом виде в памяти компьютера для последующей текстовой расшифровки и проведения акустического анализа. Инструментальный анализ осуществлялся с использованием звукового редактора PRAAT, цифровые показатели измерений обрабатывались с помощью программы EXEL.

При прослушивании записей диалогов отмечались особенности «звукоряда» речи школьников: наличие пауз между вопросительной и ответной репликой и в самой реплике; искажения начальных/конечных звуков в словах; неоднократное повторение фрагментов фраз и слов перед окончательным произнесением; затрудненное проговаривание слов внутри сложных реплик; «проглатывание» отдельных звуков в словах и слов во фразах; нечеткое интонационное оформление фраз.

В текстах расшифровок не содержится информация об искажениях при произнесении звуков, так как проведение специального фонетического анализа не входило в задачи

настоящей работы. Анализ текстового материала обеспечивал возможность определить места пауз и их количество в репликах, выделить ошибки грамматического и синтаксического плана, формировать оценочное суждение об уровне интеллектуального развития учащегося, участвующего в диалоге. Все это демонстрируют представленные выше фрагменты диалогов и результаты их анализа.

Анализ диалогов

Анализ диалогов предполагал количественную оценку ряда характеристик:

- *общие характеристики диалогов: в*ременная продолжительность диалога, число МДЕ (Минимальных Диалогических Единиц, представляющих совокупность вопросительной реплики учителя и ответной реплики школьника [6] в его составе; относительное число МДЕ с паузами между вопросительной и ответной репликой (задержка ответа);

- *характеристики речи учителя в диалоге:* относительное число реплик побудительного и поощрительного характера;

- *характеристики речи ученика в диалоге:* структура реплик (относительное число реплик, состоящих из одного слова, одного предложения, двух – трех и более предложений; наличие в реплике распространенных предложений (ССП и СПП).

Результаты проведенного анализа представлены в Таблица 1 и 2.

Таблица 1. Характеристики структуры диалогов.

Показатель	*5 класс*	*7 класс*	*8 класс*
Длительность диалогов, с	735	230	1180
Число МДЕ в составе диалога	53	26	150
Длительн9ость 1МДЕ, с	14	10	8
Число МДЕ с паузой между репликами, %	4	2	9
Число МДЕ с паузами в ответных репликах, %	32	1	15
Число побудительных реплик учителя, %	16	0	15
Число поощрительных реплик учителя, %	11	12	12

Таблица 2. Относительное количество ответных реплик с различной структурой

классы	1 слово	Предложение			ССП	СПП
		1	2	3		
5 класс	0.26	0.34	0.38	0.02	0.09	0.09
7 класс	0.23	0.35	0.35	0.08	0.04	0.15
8 класс	0.25	0.53	0.22	0		

Обозначения: ССП - сложносочиненное предложение, СПП – сложноподчиненное предложение.

В качестве дополнительной информации к данным в Таблицах 1 и 2 следует отметить, что в группе из 8 класса по сравнению с 5 и 7 классом было больше школьников с

когнитивными, артикуляционными и слуховыми нарушениями. Это обуславливало трудности формирования ответных реплик (задержка ответа, паузы в ответных репликах), преимущественно более простой состав реплик (78% - реплики из 1 слова и 1 предложения), а также большое количество реплик педагога побудительного характера и поощрительного характера. Сложная реплика, состоящая из трех предложений принадлежит мальчику 5 класса, которая показана в списке фрагментов диалогов - **4П**-мальчик ШТ.

В дополнение к средне групповым данным указать, что в каждой возрастной группе наблюдался значительный разброс индивидуальных показателей речевого поведения школьников в диалоге. Сопоставление этих показателей с индивидуальными показателями слухоречевого развития тех же школьников, ранее полученными в работе [4], выявило аналогичный характер результатов измерений. Так, оказалось, что одни и те же школьники попадают в условные категории «успешных» или «неуспешных». Это позволяет считать, что уровень освоения слухоречевых навыков выступает одним из основных факторов, влияющих на речевое поведение школьников в диалоге.

Однако на формирование ответных реплик, как с точки зрения содержания, так и оцениваемых параметров, в значительной степени влияют навыки успешного коммуникативного поведения, уровень когнитивного развития, особенности темперамента, общее состояние здоровья ученика, состояние органов слуха и артикуляции. Все это определяет и индивидуальную стратегию поведения ученика в диалоге: выбор конкретного речевого материала для ответа, степень распространенности ответных реплик, их длительность, наличие пауз и т.д. Например, для школьницы ШК (нарушение слуха) в диалоге характерно наличие пауз как между вопросной и ответной репликой, так и внутри ответной реплики. При этом число ответных реплик с паузами составляет 30% от общего числа реплик, число МДЕ с паузой между вопросительной и ответной репликой (задержка ответа) -10% от общего числа МДЕ. Она часто использует произнесение протяжного «Нуу» в качестве паузы (реплики **1.П**-ШК и **2.П**-ШК в списке фрагментов диалогов). В то же время ее ответы хорошо структурированы и включают сложные по составу предложения (24% от общего числа реплик). В качестве еще одного примера, можно сравнить тексты реплик мальчиков 5 класса (**3.П** - ШО, **4П**- ШТ, **5П**-ШЛ), по которым можно легко оценить состояние их физического здоровья и слухоречевой статус.

Заключение

Полученные в ходе работы результаты позволили выявить специфические особенности речевого поведения в диалоге школьников 5-х-8-классов с различным уровнем когнитивного развития, состояния здоровья и уровня освоения слухоречевых навыков. Измеренные характеристики диалогов могут служить ориентиром для сравнения с подобными данными в

работах того же направления. Использованная методика определения показателей диалогов может быть применена в процессе проведения корректирующих занятий для оценки освоения учениками речевых и коммуникативных навыков и выработки оптимальной стратегии обучающих и коррекционных мероприятий.

Список литературы

1. *Столярова Э.И., Белова Н.Ю.* Особенности слухоречевой функции у школьников 5-9 классов с речевыми нарушениями // Современная онтолингвистика: проблемы, методы, открытия. Мат. международной научной конференции (отв. ред. Т.А. Круглякова). Иваново: ЛИСТОС, 2019. С.554-560.

2. *Столярова Э.И., Белова Н.Ю.* Характеристики учебных диалогов со школьниками, имеющими слухоречевые нарушения // Современные технологии в организации ранней помощи детям и в образовательной практике. Сборник трудов. Санкт-Петербург: ЛЕМА, 2021. С .40-46.

3. *Лопатина А., Скребцова М*. О труде и мастерстве: Стихи, раскраски и творческие задания по пословицам (2-е изд.). М.: Философская Книга, 2014.32 с. (серия «Мудрая раскраска»; Вып.1).

4. *Солнушкин С.Д., Столярова Э.И, Чихман В.Н.* Программный интерактивный комплекс «Помощник логопеда-дефектолога» для использования при обучении детей со слухоречевыми нарушениями // Интегративная физиология, 2023. **Т.4**. №3. С.298–311. https://doi.org/10.33910/2687-1270-2023-4-3-298-311

5. С*толярова Э.И., Белова Н.Ю, Солнушкин С.Д., Чихман В.Н*. Использование инструментальных методик при обучении школьников со слухоречевыми нарушениями // Сборник трудов XXXVII сессия Российского акустического общества. М.: ООО «Изд-во «ГЕОС», 2025. С. 450-456. doi:10.34756/GEOS.2025.17.39272

6. *Казаковская В.В*. Вопросно-ответные единства в диалоге «взрослый-ребенок / Отв. ред. А.В. Бондарко. М.Д. Воейкова. - СПб.: «Наука». 2006. – 456 с. ISBN 5-02-026440-75

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39703

Методология анализа мелодического компонента оформленности высказывания (корпусное исследование на материале русского языка)

Караваева В. Г.

Московский городской педагогический университет

89858853232, karavaeva.vg@yandex.ru

Аннотация. В статье рассматривается анализ мелодического оформления высказываний на материале корпуса русской дидактической речи (8,5 ч.). Разметка включала сегментирование, автоматическое распознавание с коррекцией, нанесение слоя фразы, а также выделение границ синтагм и 8 типов ядерных тонов. Методика ранее успешно применялась к китайскому и эвенкийскому языкам, что обусловило ее использование для русского языка. Анализ мелодического компонента в речи носителей русского языка проводился по параметрам: уровень и диапазон ЧОТ, характер движения ядерного тона. Ранжирование позволило выделить 5 рангов в речи обоих полов. Наиболее широкий диапазон зафиксирован для синтагм с восходяще-нисходящим ядерным тоном (156 Гц у женщин, 131 Гц у мужчин) и серии нисходящих (152 Гц и 126 Гц). Второй ранг занимают нисходяще-восходящие (138 Гц, 109 Гц) и восходящие (142 Гц, 101 Гц) контуры. Самый узкий диапазон – у синтагм, где реализован ровный контур ядерного тона (77 Гц и 63 Гц). Полученные результаты позволяют заключить, что различные фонологические типы ядерных тонов реализуются, в том числе, через определенную широту диапазона синтагмы.

Ключевые слова: мелодическое оформление высказывания, русская речь, синтагма, ядерный тон, мелодический уровень, мелодический диапазон

Methodology for the analysis of the melodic patterns of intonation (corpus study of russian didactic speech)

V.G. Karavaeva

Moscow City University

Phone: +7(985)885-3232, karavaeva.vg@yandex.ru

Abstract. The paper examines the melodic patterns of Russian didactic speech (8,5 hours). The corpus annotation included speech samples segmentation, automatic speech recognition, creation of phrase and intonation phrase tiers. The methodology had previously been successfully applied to Chinese and Evenki, which motivated its use for Russian. The analysis of the melodic patterns of native Russian

speakers was conducted according to the following parameters: pitch level and range, pitch contour of the nuclear tone. Five ranks were identified in speech of both genders. The widest range was observed for the intonation phrases with the rise-fall nuclear contour (156 Hz in female, 131 Hz in male), as well as for the series of falls (152 Hz and 126 Hz, respectively). The second rank included fall-rise (138 Hz, 109 Hz) and rise (142 Hz, 101 Hz) contours. The narrowest range was found for the intonation phrases with level nuclear contour (77 Hz и 63 Hz). The obtained results suggest that different phonological types of nuclear tones are realized, among other means, through a specific width of the pitch range of the intonation phrase.

Keywords: melodic pattern, intonation phrase, nuclear tone, pitch level, pitch range, pitch contour

Статья посвящена вопросам разметки просодии, автоматического сбора показателей основного тона с размеченных участков и методологии интерпретации собранных значений. Материалом для исследования послужил корпус русской дидактической речи [Свидетельство о…, 2025], в который вошли записи проблемных дискуссий семинарских занятий. Объем звучащей речи составил 8,5 часов. Спикерами выступили 14 преподавателей и 171 студент МГПУ. В ходе настоящего эксперимента была проанализирована только речь преподавателей. Процесс разметки корпуса включал несколько этапов обработки (сегментирование аудиозаписей на реплики, автоматическое распознавание речи и автоматическое нанесение разметки алайнером с последующей корректировкой, нанесение слоя фразы) [Караваева, 2025].

На следующем этапе работы над проектом эксперты в области акустического анализа речевого сигнала выполнили разметку просодии: разметили границы синтагм, проставили теги маркировки контуров ядерного тона (ровный, нисходящий, нисходяще-восходящий, серия нисходящих, специальный подъем, восходяще-нисходящий, серия восходящих) [Тарева, Караваева, Толмачева, 2024]. Схожий подход был ранее применен на материале китайского языка (социальная и коммерческая реклама) [Караваева, Чжан, Андросова, 2021] и эвенкийского языка для разметки интонации перечисления на материале троекратно повторяющихся слов и доказал свою эффективность в связи с чем был применен в отношении русского языка. Процесс автоматического сбора частоты основного тона осуществлялся посредством Python библиотеки praatio [Mahrt, 2016] на интервале синтагмы со следующими настройками: шаг: sampleStep: float = 0.01, silenceThreshold: float = 0.03. Показатели основного тона и информация о тегах разметки со слоев с разметкой 1) слов и пауз, 2) аллофонов; 3) рамочных тактик структурирования дискуссии, 4) тактик управления дискуссией; 5) контуров ядерного тона были агрегированы в

таблицу в формате .csv и обработаны посредством Python библиотеки pandas для дальнейшего статистического анализа.

Анализ мелодического компонента оформленности высказываний в речи носителей русского языка (преподавателей: мужчин и женщин) в ходе учебной дискуссии производился по следующим параметрам: минимальное и максимальное значение ЧОТ в пределах синтагмы – уровень основного тона; разница между минимальным и максимальным значением ЧОТ в пределах синтагмы – мелодический диапазон; характер движения ядерного тона.

Для выявления зависимости между средними значениями мелодического диапазона и характером движения ядерного тона в речи мужчин и женщин было проведено ранжирование средних значений мелодического диапазона для каждого из типа синтагм: 1) было рассчитано среднее значение мелодического диапазона для каждого типа синтагмы; 2) полученные значения были ранжированы в порядке убывания; 3) была рассчитана разница между средними значениями (шаг). Расчёт разницы выполнялся относительно верхней границы текущего ранга, а не между соседними значениями, что позволило избежать объединения акустически удалённых значений в один ранг. В случае, если шаг был менее 10 Гц средние значения мелодического диапазона относились к одному рангу (см. табл.1–2).

Эксперимент позволил получить следующие результаты. Существенным гендерным различием можно назвать тот факт, что средние значения мелодического диапазона в речи женщин для всех типов проанализированных синтагм выше, чем в речи мужчин.

В рамках анализа рангового распределения средних значений мелодического диапазона было выделено 5 рангов в речи мужчин и женщин и отмечены некоторые закономерности (см. табл. 1–2). Самый широкий диапазон ЧОТ в пределах синтагмы в речи мужчин и женщин характерен для восходяще-*нисходящего* контура с диапазоном 156 Гц (женщины) и 131 Гц (мужчины) и серии *нисходящих* тонов с (152 Гц – женщины, 126 Гц – мужчины). Второй ранг частотности занимают синтагмы, в которых реализуются нисходяще-*восходящие* (138 Гц – женщины, 109 Гц – мужчины) и *восходящие* (142 Гц – женщины, 101 Гц – мужчины) контуры. Последнюю позицию (самый узкий мелодический диапазон) занимают синтагмы с ровным контуром ядерного тона со значениями 77 Гц (женщины) и 63 Гц (мужчины).

Таблица 1. Ранжирование средних значений мелодического диапазона в речи мужчин

Контур ядерного тона	Мелодический диапазон	Шаг	Ранг (мужчины)
Серия нисходящих (4)	126 Гц	**Гц**	**Ранг 1**
Нисходяще-восходящий (3)	109 Гц	**2 Гц**	Ранг 2
Восходящий (2)	101 Гц	Гц	Ранг 2
Нисходящий (1)	95 Гц	**4 Гц**	Ранг 3
Специальный подъем (5)	79 Гц	**6 Гц**	Ранг 4
Серия восходящих (7)	73 Гц	Гц	Ранг 4
Ровный (0)	**63 Гц**	**0 Гц**	**Ранг 5**

Таблица 2. Ранжирование средних значений мелодического диапазона в речи мужчин

Контур ядерного тона	Мелодический диапазон (женщины)	Шаг	Ранг (женщины)
Восходяще-нисходящий (6)	156 Гц		**Ранг 1**
Серия нисходящих (4)	152 Гц	**Гц** *156 Гц - 152 Гц)*	**Ранг 1**
Восходящий (2)	142 Гц	**4 Гц** *156 Гц - 142 Гц)*	Ранг 2
Нисходяще-восходящий (3)	138 Гц	Гц *142 Гц - 138 Гц)*	Ранг 2
Серия восходящих (7)	138 Гц	Гц *142 Гц - 138 Гц)*	Ранг 2
Специальный подъем (5)	122 Гц	**0 Гц** *142 Гц - 122 Гц)*	Ранг 3
Нисходящий (1)	110 Гц	**2 Гц** *122 Гц - 110 Гц)*	Ранг 4
Ровный (0)	**77 Гц**	**3 Гц** *110 Гц - 77 Гц)*	**Ранг 5**

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод о том, что различные фонологические типы ядерных тонов реализуются, в том числе, и через определенную широту диапазона синтагмы.

Перспективу исследования составит изучение темпорального и паузального компонентов интонации в речи преподавателей в ходе учебной дискуссии и их взаимосвязи с коммуникативными стратегиями педагогического воздействия и взаимодействия.

Список литературы

1. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2025622122 Российская Федерация. Устный корпус русской дидактической речи : заявл. 18.04.2025 : опубл. 22.05.2025 / Е. Г. Тарева, В. Г. Караваева, Т. А. Толмачева ; заявитель Государственное автономное образовательное учреждение высшего образования города Москвы «Московский городской педагогический университет». – EDN PBARXT.

2. Тарева, Е. Г. Алгоритм обработки аудиозаписей звучащей дидактической речи для последующего обучения нейронной сети распознаванию базовых эмоций / Е. Г. Тарева, В. Г. Караваева, Т. А. Толмачева // Фонетика сегодня : Тезисы докладов IX Международной научной конференции, Москва, 05–07 декабря 2024 года. – Москва: Институт русского языка им. В.В. Виноградова РАН, 2024. – С. 86-88. – EDN JLZWUG.

3. Караваева, В. Г. Регистровые значения основного тона китайских слогов в коммерческом и социальном рекламном дискурсе / В. Г. Караваева, Ц. Чжан, С. В. Андросова // Научный вектор Балкан. – 2021. – Т. 5, № 1(11). – С. 32–36. – DOI 10.34671/SCH.SVB.2021.0501.0006. – EDN HQQCPB.

4. Tim Mahrt. PraatIO. https://github.com/timmahrt/praatIO, 2016. Версия 6.2.2 (16.01.2026)

5. Караваева, В. Г. Корпусной подход к дискурсивному анализу явлений связной речи в разносистемных языках / В. Г. Караваева // Теоретическая и прикладная лингвистика. – 2025. – Т. 11, № 3. – С. 87-103. – DOI 10.22250/24107190-2025-11-3-87. – EDN QTHVMM.

УДК 004.934 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39704

Сравнительное исследование двух методов оценки разборчивости речи

М.Б. Столбов [1,a], Д.А. Давыдов [1,b], В.И. Кабаров [1,c]

[1)] Университет ИТМО, Факультет информационных технологий и программирования, Санкт-Петербург, 197101, Кронверкский пр., д.49, лит. А

E-mail: [a)]stolbov_mb@mail.ru [b)]340193@niuitmo.ru [c)] vikabarov@itmo.ru

Аннотация: Оценка разборчивости речевых сигналов (РС) является важной задачей в телекоммуникациях, криминалистике, архитектурной акустике, при разработке систем синтеза речи и ряде других областей. Одной из эффективных мер объективной оценки разборчивости речи является мера STOI (англ. Short-Time Objective Intelligibility). В работе проведено сравнительное исследование методов эталонной и безэталонной оценки разборчивости речи (РР) на основе глубокой сверточной нейронной сети (НС), предсказывающей значение индекса STOI непосредственно по искаженному сигналу.

Ключевые слова: оценка разборчивости речи, метрика STOI, безэталонные методы

PACS: 43.60.−c Acoustic signal processing

Comparative study of two methods for speech intelligibility assessment

M.B. Stolbov[1,a], D.A. Davydov[1,b], V.I. Kabarov[1,c]

[1)] Department of Information Technology and Programming, ITMO University, St. Petersburg, 197101, Russia

E-mail: [a)]stolbov_mb@mail.ru [b)]340193@niuitmo.ru [c)] vikabarov@itmo.ru

Abstract: The assessment of speech signal (SS) intelligibility is an important task in telecommunications, forensics, architectural acoustics, speech synthesis system development, and several other fields. One effective measure for objectively assessing speech intelligibility is the Short-Time Objective Intelligibility (STOI) measure. This paper presents a comparative study of intrusive and non-intrusive methods for speech intelligibility assessment based on a neural network that predicts the STOI index directly from the distorted (SS).

Keywords: speech intelligibility assessment, STOI metric, non-intrusive methods

PACS: 43.60.−c Acoustic signal processing

Введение

Задача оценки качества и разборчивости речи (РР) является важной для многих практических применений: контроль качества в телекоммуникациях и вещании, судебная экспертиза аудиозаписей, анализ архивных аудиозаписей, автоматический анализ и синтез речи, архитектурная акустика.

Основой оценок РР являются *субъективные* методы, основанные на восприятии речи группой слушателей, регламентированные международными и отечественными стандартами **(ITU-T P.800, ГОСТ Р 50840-95)**. Субъективные методы обладают существенными недостатками: они трудоемки, требуют значительных временн***ы***х и финансовых затрат, а их оценка не поддается автоматизации. В качестве альтернативы разработаны объективные меры, прогнозирующие результат субъективного тестирования на основе оценки характеристик речевых сигналов. Основными объективными мерами РР являются следующие: формантные (AI, fAI, SII, SNR loss, SNA), модуляционные (STI, RASTI, STIPA, STITEL), временные (STOI).

Для оценки и предсказания объективных мер *PP* используют три основных группы методов: модельные (косвенные), активные (эталонные), пассивные (неинтрузивные, неэталонные).

В основе модельных методов лежат теоретические соотношения между задаваемыми априорно известными параметрами канала звукозаписи (уровень шума, время реверберации, импульсный отклик и др.) и характеристиками *PP*. Модельные методы обычно используются на этапе проектирования систем.

В основе эталонных методов лежит оценка параметров, необходимых для расчета показателей *PP*, которая осуществляется с использованием тестовых сигналов. В роли тестового сигнала может выступать образцовый сигнал (неискаженный речевой или речеподобный сигнал). Тестовый сигнал проходит через канал звукозаписи и сравнивается с исходным образцовым сигналом.

Ограничением эталонных методов является необходимость наличия эталонного сигнала для сравнения с тестируемой записью. В подавляющем большинстве реальных сценариев, например, при работе с *судебными* или *архивными записями*, доступ к такому эталону невозможен, что делает эталонные методы непригодными для решения задачи оценки качества аудиозаписей.

Таким образом, актуальной является задача разработки безэталонных методов, способных оценить *PP*, анализируя исключительно имеющийся речевой сигнал или саму тестируемую аудиозапись.

1. Кратковременная объективная мера разборчивости

Кратковременная объективная мера разборчивости *(Short-time objective intelligibility measure – STOI)* рассмотрена в ряде работ, например [1,2]. Данный метод дает кратковременную оценку разборчивости на **скользящем участке** сигнала. Пример схемы оценки *STOI* приведен на рисунке 1 [2].

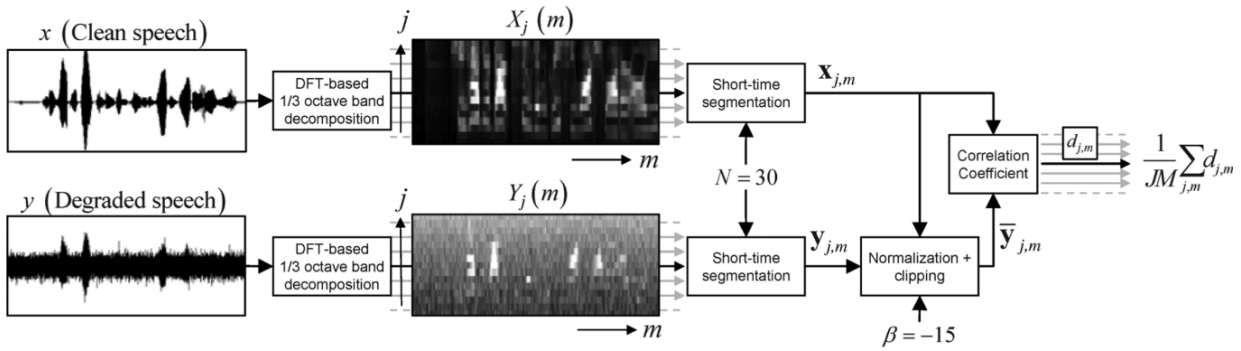


Рис. 1. Схема оценки STOI [2]

В основу метода положена оценка корреляции между временными огибающими спектров X_{jm} *эталонного* и Y_{jm} *тестируемого*:

$$d_{jm} = \frac{\left(X_{jm} - \langle X_{jm}\rangle\right)^T \cdot \left(Y_{jm} - \langle Y_{jm}\rangle\right)}{\left\|X_{jm} - \langle X_{jm}\rangle\right\| \cdot \left\|Y_{jm} - \langle Y_{jm}\rangle\right\|},$$

где j, m — индексы частотной полосы и кадра, $\langle\ \rangle$ – усреднение по кадрам, $\|\ \|$– норма.

Итоговая мера разборчивости вычисляется усреднением оценок корреляций огибающих по частотам и кадрам:

$$STOI = \frac{1}{JM}\sum_{j,m} d_{jm},$$

где M – количество кадров, J – количество частотных полос.

2. Нейросетевая оценка STOI

Анализ публикаций [2-5] показывает, что наиболее перспективными методами оценки РР является подход на основе машинного обучения.. В работе предлагается подход, который наследует идею *data-driven* методов, подобных *NISA* [3]. Для обучения и тестирования нейросетевой модели были взяты *корпуса данных:* **CMU-MOSEI, VoxCeleb.**

К чистым РС были применены алгоритмы реверберации и аддитивный шум с различными характеристиками, отношением сигнал/шум в диапазоне от *-5 дБ* до *20 дБ*, а также разным временем реверберации в диапазоне от *0.3* до *1.2 с*.

Для каждого полученного искаженного сигнала с помощью *эталонного* алгоритма вычислялось целевое значение разборчивости – метрика *STOI*. Таким образом, итоговый *корпус данных* представляет собой набор пар эталонных и искаженных сигналов. Распределение

значений *STOI* в корпусе для разных типов искажений изображено на рисунке 2.

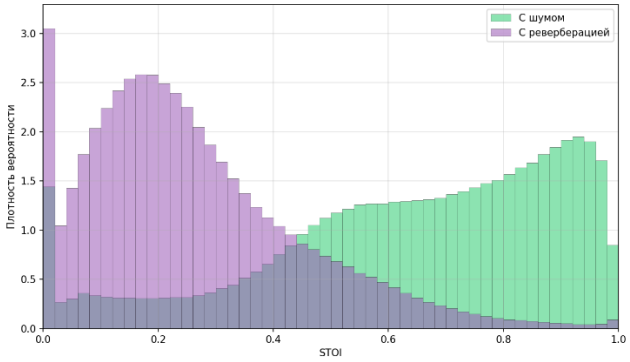


Рис. 2. Распределение значений STOI в корпусе данных

Такое распределение значений STOI в корпусе данных позволяет модели обучаться в широком спектре условий (от идеальной (1.0) до очень низкой (0.0) разборчивости).

В качестве базовой архитектуры для решения задачи регрессии была выбрана сверточная нейронная сеть (CNN) [6], используемая для предсказания STOI (рисунок 3).

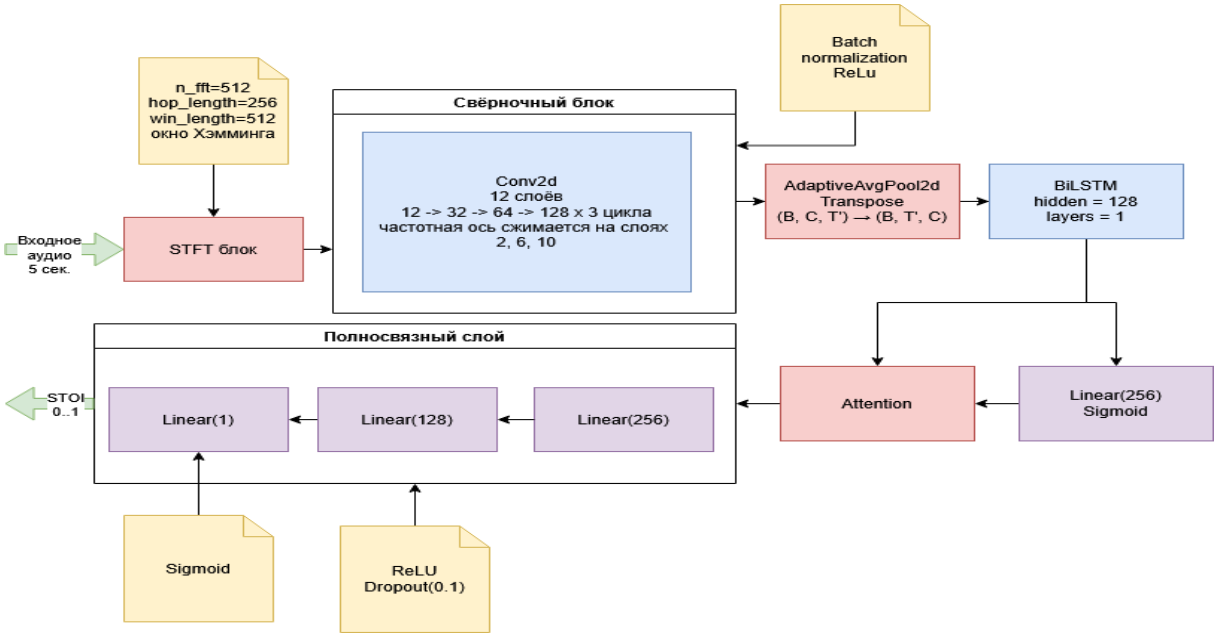


Рис. 3. Архитектура нейронной сети STOI-CNN

Архитектура состоит из каскада из четырех сверточных блоков, BiLSTM слоя с механизмом внимания и блока с полносвязанными слоями. Модель принимает на вход аудио фрагменты по 5 секунд. Каждый фрагмент поступает на обработку в блок STFT, в котором реализуется функция кратковременного преобразования Фурье. Полученный фрагмент в виде матрицы подаётся на 12 сверточных слоев, далее в блок BiLSTM с механизмом внимания и на два полносвязных слоя с дропаутом для регуляризации модели. Финальный линейный слой выдает предсказанное значение метрики STOI в диапазоне от 0 до 1.

Таким образом, модель прогнозирует объективную меру разборчивости речи, исключая

необходимость ручного конструирования признаков и эталонного сигнала.

3. Результаты экспериментов

Для количественной оценки эффективности предложенной модели были использованы стандартные метрики регрессии на независимой тестовой выборке. Получены следующие результаты.

Значение коэффициента детерминации $R^2 = 0.98$ свидетельствует о том, что модель объясняет *92%* изменчивости эталонных значений *STOI*. Низкие значения *MAE* и *RMSE* (*0.03 и 0.05* соответственно) подтверждают, что модель не только точно предсказывает значения *STOI*, но и обеспечивает высокую точечную точность, при этом среднее отклонение от истинного значения не превышает *0.03* по шкале *STOI*.

На рисунке 4 представлено распределение предсказанных моделью значений *STOI* в зависимости от истинных (эталонных) значений. Распределение ошибок предсказания представлено на рисунке 5.

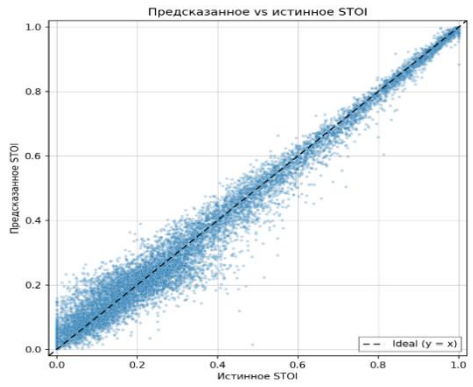


Рис. 4. Зависимость истинных значений STOI от предсказанных

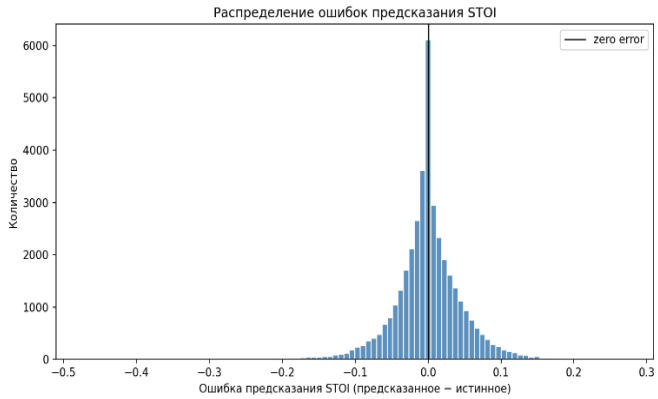


Рис. 5. Распределение ошибок предсказания STOI

Точки зависимости предсказанных и истинных значений *STOI* группируются вокруг *биссектрисы*, что визуально подтверждает **высокую корреляцию** между прогнозом модели и эталоном. Распределение ошибок предсказания является близким к **нормальному** с малой дисперсией, что указывает на отсутствие систематического смещения в работе модели.

Заключение

В работе поставлена и решена задача разработки метода безэталонной экспресс-оценки разборчивости речи в условиях отсутствия эталонного сигнала. Предложен и реализован подход на основе гибридной нейросетевой архитектуры, объединяющей *сверточные* и *полносвязные* слои для сквозного анализа *мел-спектрограмм*. Экспериментальные результаты

на тестовой выборке продемонстрировали высокую эффективность модели: коэффициент детерминации составил *0.98*, средняя абсолютная ошибка – *0.03*.

Таким образом, подтверждена принципиальная возможность использования глубокого машинного обучения для оценки объективной метрики *STOI* исключительно на основе искаженной фонограммы.

Список литературы

1. *Sharma D. et al*. Data driven method for non-intrusive speech intelligibility estimation. 18th European Signal Processing Conference (EUSIPCO-2010), pp. 1899-1903.

2. *Grancharov V. et al.* Low complexity, nonintrusive speech quality assessment //IEEE Trans. Audio, Speech, Lang. Process., 2006, **vol. 14**, pp. 1948–1956.

3. *Sharma D. et al.* A data-driven non-intrusive measure of speech quality and intelligibility // Speech Communication. – 2016, **vol. 80**, pp. 84-94.

4. *Duangpummet S., et al.* Blind Estimation of Room Acoustic Parameters and Speech Transmission Index using MTF-based CNNs // arXiv:2103.07904v1 2021, pp. 1-5.

5. *Топников А.И. и др.* Неэталонная оценка разборчивости зашумленных речевых сигналов // Цифровая обработка сигналов №1, 2015, с.39-44.

6. *Zezario R. E. et al.* STOI-Net: A deep learning based non-intrusive speech intelligibility assessment model //2020 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC). – IEEE, 2020. – С. 482-486.

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39705

Топология реализации субъективного звукового поля

Потапова Р.К.[1)], Потапов В.В.[2)], Померанцев Н.Д.[3)]

[1!]Институт прикладной и математической лингвистики Московского государственного лингвистического университета, Москва;

[2)]Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва;

[3)]Кафедра прикладной и экспериментальной лингвистики Московского государственного лингвистического университета, Москва.

Тел.: +7(999)908-9891; E-mail: nicetes@gmail.com

Восприятие эмоциональной информации в речи и музыке демонстрирует значительную индивидуальную вариативность, однако эта индивидуальность редко анализируется как структурированное явление. Предлагаемое исследование реконструирует топологию субъективного звукового поля, описание того, как человек организует эмоциональное значение акустических сигналов в единое многомерное пространство.

В эксперименте участникам предъявляются речевые фрагменты с контролируемыми просодическими параметрами (высота, темп, ритм, тембр), музыкальные и визуальные стимулы. Фиксируется эмоциональное состояние участника.

Методом многомерного шкалирования реконструируется индивидуальная топология звукового пространства каждого участника. Анализируются размерность этого пространства, дифференцированность эмоциональных регионов, плотность оценок и кросс-модальные соответствия. Индивидуальные различия переосмысляются не как личностные черты, а как различия в текущей организации психологического поля.

Исследование развивает концептуальный аппарат теории поля (Lewin, 1936) применительно к эмоциональному восприятию слуховых сигналов, предлагая топологическое описание перцептивного пространства как инструмент анализа субъективного опыта в акустике речи.

Lewin, K. (1936). *Principles of Topological Psychology.* McGraw-Hill

Ключевые слова: топология восприятия, семантическое пространство, слуховое восприятие, кросс-модальные соответствия, звуковой символизм

УДК: 534.784; 612.85 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39706

Отражение эмоционального состояния в характеристиках речи детей 5-7 лет со смешанными специфическими расстройствами психологического развития

Граве П.И. [1, а], **Николаев А.С.**[1, 2]

[1] *Санкт-Петербургский государственный университет. Санкт-Петербург, 199034, Университетская наб. 7-9.*

[2] *Северо-Западный государственный медицинский университет им. И.И. Мечникова. Санкт-Петербург, 191015, ул. Кирочная, д.41.*

E-mail: [а] *st087500@student.spbu.ru*

Аннотация: Работа посвящена изучению особенностей отражения эмоциональных состояний в речи детей 5–7 лет со смешанными специфическими расстройствами психологического развития (СР). В исследовании приняли участие 15 типично развивающихся (ТР) детей и 10 детей с СР. В работе использован методический подход для оценки эмоциональной сферы детей CEDM, разработанный в Группе по изучению детской речи СПбГУ. Запись речи детей проводили в модельных ситуациях: диалог с экспериментатором — спонтанная речь, и «актёрская» речь — произнесение ребёнком слов и фраз в 4 эмоциональных состояниях: «радость — нейтральное (спокойное) состояние — печаль — гнев». С целью изучения возможности распознавания взрослыми эмоционального состояния детей по их речи проведен перцептивный эксперимент, в котором приняло участие 5 взрослых аудиторов и 5 взрослых экспертов. Создано 4 тестовых последовательности, включающих речевой материал «актерской» и спонтанной речи ТР детей и детей с СР. Показаны различия в распознавании аудиторами эмоционального состояния детей с СР. Осуществлен инструментальный спектрографический анализ речевого материала, включенного в тестовую последовательность перцептивного эксперимента. Выявлены различия в акустических характеристиках эмоциональной речи детей с ТР и СР.

Ключевые слова: детская речь, смешанные специфические расстройства психологического развития, акустический спектрографический анализ, перцептивный анализ

Reflection of emotional state in speech characteristics of children aged 5-7 years with Mixed Specific Developmental Disorders

Grave P.I. [1),a], Nikolaev A.S.[1, 2)]

[1] Saint Petersburg State University, Universitetskaya Embankment 7–9, St. Petersburg 199034, Russia

[2] I. I. Mechnikov North-Western State Medical University, Kirochnaya Street 41, St. Petersburg 191015, Russia

E-mail: [a] st087500@student.spbu.ru

Abstract: This study examines the reflection of emotional states in the speech of 5- to 7-year-old children with mixed specific developmental disorders (MSDD). The participants were 15 typically developing (TD) children and 10 children with MSDD. The CEDM methodological approach for assessing children's emotional sphere, developed by the Child Speech Research Group at St. Petersburg State University, was employed. Children's speech was recorded in modeled situations: dialogue with the experimenter — spontaneous speech; and "acting" speech — the child pronouncing words and phrases in four emotional states: "joy — neutral (calm) state — sadness — anger." To determine adults' ability to recognize children's emotional states by their speech, a perceptual experiment was conducted involving 5 adult listeners and 5 adult experts. Differences in the recognition of emotional states of children with MSDD by the adult auditors were demonstrated. An instrumental spectrographic analysis of the speech material included in the test sequence of the perceptual experiment was carried out. Differences in the acoustic characteristics of words produced by typically developing children versus children with MSDD were revealed.

Keywords: children's speech, mixed specific developmental disorders, acoustic spectrographic analysis, perceptual analysis

PACS: 43.70.+i; 43.71.+m

Введение

Смешанные специфические расстройства психологического развития (СР) по международной классификации болезней 10-го пересмотра (МКБ-10) представляют собой гетерогенную группу нарушений, при которых у ребёнка одновременно выявляются расстройства речи и языка, учебных навыков и двигательных функций, ни одно из которых не является преобладающим. Ряд исследований на материале разных языков посвящён восприятию эмоций в речи детьми с расстройствами аутистического спектра (РАС), синдромом дефицита внимания и гиперактивности (СДВГ) [1,2]. Получены данные о перцептивных характеристиках речи и автоматическом распознавании эмоциональных

состояний детей с атипичным развитием на основе их речи [3]. Немногочисленны комплексные исследования, совмещающие акустический анализ речи типично развивающихся (ТР) детей и детей с СР и выявление особенностей восприятия взрослыми эмоциональных состояний в речи детей с атипичным развитием.

Целью данной работы является изучение особенностей отражения эмоциональных состояний в речи детей 5–7 лет со смешанными специфические расстройствами психологического развития.

1. Методы исследования

В исследовании принял участие 25 детей в возрасте 5-7 лет: 10 детей имели в анамнезе диагноз смешанные специфические расстройства психологического развития (F83 – по МКБ 10 пересмотра), 15 ТР детей, выступающих в качестве контрольной группы. В работе использован методический подход оценки эмоциональной сферы детей CEDM, разработанный в Группе по изучению детской речи СПбГУ [4] в рамках выполнения проекта РНФ. Методика включала в себя тестовые задания на отражение ребенком эмоций в речи. В ходе исследования ребенок выполнял задание в виде диалога с экспериментатором, интервью о знании ребенком эмоций, задание на «актерскую» речь: произнесение слов и фраз, отражающих эмоциональные состояния «радость — нейтральное (спокойное состояние) — печаль — гнев».

С целью изучения возможности распознавания взрослыми эмоционального состояния детей по их речи проведен перцептивный эксперимент, в котором приняли участие 5 взрослых аудиторов, из них 3 женщины, 2 мужчины, средний возраст аудиторов составил 22±1.5 год, и 5 взрослых (экспертов), из них 2 женщины, 3 мужчин, средний возраст экспертов составил 31.4±6.48 год. Для перцептивного теста создано 4 тестовые последовательности, каждая из которых содержала по 30 речевых фрагментов, аннотированных по четырем эмоциональным состояниям «радость — нейтральное (спокойное) — печаль — гнев». При составлении тестов на распознавание взрослыми эмоций детей по речи выбирали два типа речевого материала: спонтанную речь (диалог экспериментатора с ребёнком и интервью об эмоциях) и «актерскую» речь.

Произведен акустический спектрографический анализ речевого материала, включённого в перцептивный тест, в звуковом редакторе «Cool Edit Pro». В фрагментах детской речи выделяли ударное слово, определяли значения частоты основного тона (F0. ЧОТ, Гц) слова, максимальные (F0 max) и минимальные (F0 min) значения ЧОТ слова. На основе данных акустического анализа рассчитывали значение диапазона ЧОТ – разности между максимальными и минимальными значениями ЧОТ [F0max – F0 min].

В программе «Statistica 10» проводили статистическую обработку данных с использованием непараметрического критерия Манна — Уитни.

Исследование одобрено Этическим комитетом Санкт-Петербургского Государственного университета (№ протокола 115-02-2).

2. Результаты

2.1. Перцептивный анализ

Показаны особенности распознавания взрослыми эмоционального состояния детей с СР по речи в перцептивном эксперименте. Результаты перцептивного эксперимента представлены в виде матрицы спутывания (табл. 1), где строки соответствуют заданным классам (эмоциональным состояниям детей), столбцы — количеству ответов аудиторов при определении состояния ребёнка; значения соответствуют количеству ответов аудиторов; выделены цифры, соответствующие правильным ответам. По «актерской» речи детей с СР аудиторы лучше распознают нейтральное состояние (71% правильных ответов), состояние печали (64%) и состояние радости (60%) по сравнению с состоянием гнева (34%). Эксперты лучше распознают по «актерской» речи детей с атипичным развитием нейтральное состояние (63%) состояние радости (63%) и печали (52%) по сравнению с состоянием гнева (35%).

Таблица 1

Матрица спутывания: распознавание аудиторами и экспертами эмоционального состояния по «актерской» речи детей с СР (%)

	радость		нейтральное		печаль		гнев	
радость	**60**	**63**	29	34	11	3	0	0
нейтральное	6	14	**71**	**63**	20	20	3	3
печаль	3	8	33	40	**64**	**52**	10	0
гнев	23	29	20	23	23	13	**34**	**35**

Ответы аудиторов выделены синим цветом, ответы экспертов – оранжевым.

Таблица 2

Матрица спутывания: распознавание аудиторами и экспертами эмоционального состояния по спонтанной речи детей с СР (%)

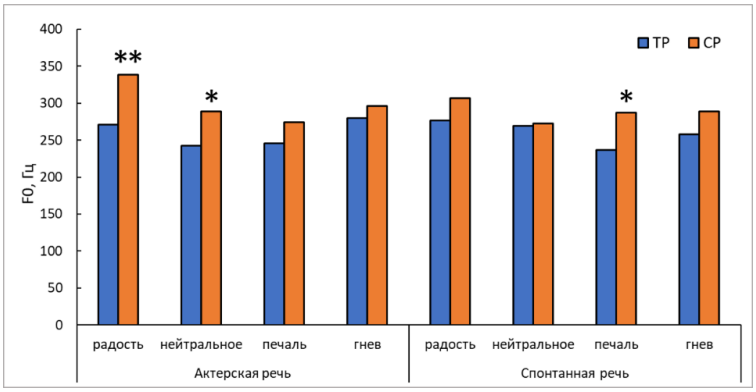
	радость		нейтральное		печаль		гнев	
радость	**62**	**67**	33	30	5	0	0	3
нейтральное	9	16	**67**	**62**	24	18	0	4
печаль	4	11	24	16	**63**	**57**	9	16
гнев	0	0	5	10	45	15	**50**	**75**

По спонтанной речи детей с СР аудиторы лучше распознают нейтральное состояние (67%), состояние радости (62%) и состояние печали (63%) по сравнению с состоянием гнева

(50%) (табл. 2). Эксперты лучше распознают по спонтанной речи детей с атипичным развитием состояние гнева (75%), состояние радости (67%) и нейтральное состояние (62%) по сравнению с состоянием печали (57%).

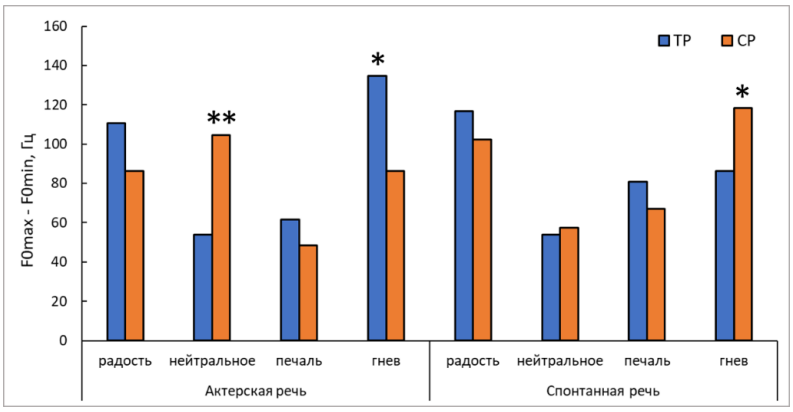
2.2. Акустический спектрографический анализ

Анализ акустических характеристик речи детей выявил различия в значениях ЧОТ слова и диапазона ЧОТ слова у ТР детей и детей с СР. Сравнение значений ЧОТ слов типично развивающихся детей и детей с СР для разных эмоциональных состояний в «актерской» и спонтанной речи показало, что значения ЧОТ в «актерской» речи детей с атипичным развитием в состоянии радости ($p < 0.01$ – критерий Манна Уитни) и нейтральном состоянии ($p < 0.05$) значимо выше, чем у типично развивающихся детей. В спонтанной речи значения ЧОТ детей с СР значимо выше в состоянии печали ($p < 0.05$) (рис. 1).



По горизонтальной оси — тип речевого материала («актерская» речь, спонтанная речь), эмоциональные состояния, по вертикальной оси — значения ЧОТ, Гц. * — $p < 0.05$; ** — $p < 0.01$ — критерий Манна — Уитни, различия между ТР детьми и детьми с СР.

Рисунок 1. Частота основного тона (ЧОТ) слова детей в разных эмоциональных состояниях в спонтанной и «актерской» речи



По горизонтальной оси — тип речевого материала («актерская» речь, спонтанная речь), эмоциональные состояния, по вертикальной оси — диапазон ЧОТ, Гц. * — $p < 0.05$; ** — $p < 0.01$ — критерий Манна — Уитни, различия между ТР детьми и детьми с СР.

Рис. 2. Диапазон ЧОТ слов детей в разных эмоциональных состояниях в спонтанной и «актерской» речи

Значения диапазона ЧОТ у детей с СР в «актерской» речи в нейтральном состоянии

(p <0.01) значимо выше, чем у ТР детей. У детей типичным развитием значение длительности слов в «актерской» речи в состоянии гнева (p <0.05) значимо выше по сравнению с детьми с СР. В спонтанной значение диапазона ЧОТ слов в состоянии гнева значимо выше (p <0.05) у ТР детей по сравнению с детьми с СР (рис. 2).

Заключение

Результаты перцептивного исследования, проведенного с целью распознавания взрослыми эмоций детей по их речи, показали, что по актерской речи детей с СР аудиторы лучше распознают нейтральное состояние и состояние печали по сравнению с экспертами, эксперты лучше распознают состояние радости и гнева по сравнению с аудиторами. По спонтанной речи детей с СР эксперты распознают более точно состояние гнева и радости сравнению с аудиторами, аудиторы лучше распознают нейтральное состояние и состояние печали по сравнению с экспертами.

Показаны различия в акустических характеристиках эмоциональной речи ТР и детей с СР. Значения частоты основного тона слов в «актерской» речи детей с атипичным развитием значимо выше в состоянии радости и нейтральном состоянии по сравнению с типично развивающимися детьми. В спонтанной речи значение ЧОТ у детей с СР значимо выше в состоянии печали. Диапазон ЧОТ слов ТР детей в «актерской» речи выше в состоянии гнева по сравнению с детьми с атипичным развитием. Диапазон ЧОТ слов детей с СР в «актерской» речи значимо выше в нейтральном состоянии, в спонтанной речи – в состоянии гнева.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ (№ 25-15-00139)

Список литературы

1. *Löytömäki J., Ohtonen P., Laakso M.-L., Huttunen K.* The role of linguistic and cognitive factors in emotion recognition difficulties in children with ASD, ADHD or DLD // International Journal of Language & Communication Disorders. 2020. **55**, N 2. P. 231–242.

2. *Bahn D., Vesker M., Schwarzer G., Kauschke C.* A multimodal comparison of emotion categorization abilities in children with developmental language disorder // Journal of Speech, Language, and Hearing Research. 2021. **64**, N 3. P. 993–1007.

3. *Mencattini A., Mosciano F., Comes M. C., Di Gregorio T., Raguso G., Daprati E., Ringeval F., Schuller B., Di Natale C., Martinelli E.* An emotional modulation model as signature for the identification of children developmental disorders // Scientific Reports. 2018. **8**. Article 14487.

4. *Lyakso E., Frolova O., Kleshnev E., Ruban N., Mekala A.M., Arulalan K. V.* Approbation of the Child's Emotional Development Method (CEDM) // ACM International Conference Proceeding Series. 2022. P. 201–210.

УДК: 534.785; 612.1/.8 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39707

Особенности электроглоттограммы женщин с нарушениями работы голосовых складок

А. Ильяс[1, a], О.В. Фролова[1]

[1] *Санкт-Петербургский государственный университет, Биологический факультет, кафедра ВНД и психофизиологии, группа по изучению детской речи, Санкт-Петербург, 199034, Университетская наб. 7-9*

E-mail: [a]abilay460@gmail.com

Цель исследования – сравнить параметры электроглоттограммы (ЭГГ) женщин – вокалисток с диагнозом дисфония и женщин без выявленных нарушений работы голосовых складок. Собрана база данных ЭГГ взрослых - 57 женщин и 15 мужчин в возрасте от 19 до 39 лет. Из базы данных выбраны ЭГГ 7 женщин-вокалисток с диагнозом дисфония (R49.0 по МКБ-10) и 10 вокалисток без функциональных нарушений голосовых складок (контрольная группа). Проанализированы ЭГГ при произнесении изолированных гласных /a/, /u/ и /i/. Определены параметры ЭГГ: коэффициент CQ (contact quotient — коэффициент, указывающий на долю времени смыкания голосовых складок в одном глоттальном цикле), форма глоттографической волны и значения частоты основного тона (ЧОТ). Описаны различия в форме электроглоттографической волны при произнесении изолированных гласных звуков у женщин с дисфонией и в контрольной группе. Полученные данные в перспективе могут быть использованы для создания неинвазивного метода определения нарушений работы голосовых складок по характеристикам электроглоттограммы.

Ключевые слова: электроглоттограмма, дисфония, голосовые складки, частота основного тона, коэффициент CQ.

Electroglottography Features in Women with Vocal Fold Disorders

A. Ilyas[1, a], O. V. Frolova[1]

[1]*St. Petersburg State University, Universitetskaya emb., 7-9, St. Petersburg, Russia, 199034*

E-mail: [a]abilay460@gmail.com

The aim of the study was to compare the electroglottogram (EGG) features of female vocalists diagnosed with dysphonia and women without any identified vocal fold disorders. The database of adult EGGs: 57 women and 15 men aged 19 to 39 years was collected. EGGs of 7 female vocalists with diagnosed dysphonia (ICD-10 R49.0) and 10 female vocalists without any

functional vocal fold disorders (control group) were selected from the database. EGGs were analyzed during the pronunciation of isolated vowel sounds /a/, /u/ and /i/ in the natural register. The following EGG parameters were determined: the CQ coefficient (contact quotient - a coefficient indicating the proportion of time of vocal fold closure in one glottal cycle), the shape of the glottographic wave and the pitch values. Differences in the electroglottographic waveform during the production of isolated vowel sounds in women with dysphonia and in a control group are described. The data obtained may potentially be used to develop a non-invasive method for identifying vocal fold dysfunction based on electroglottogram features.

Key words: electroglottogram, dysphonia, vocal folds, fundamental frequency, CQ coefficient

PACS: 43.70.+i, 43.70.Dn, 43.80.Qf

Введение

Дисфония (R49.0 по МКБ-10) – дисфункция голосовых складок разной степени тяжести, обусловленная различными неврологическими [1] и/или органическими заболеваниями [2]. Электроглоттография – объективный метод оценки работы голосовых складок [3]. Форма сигнала, полученного в результате записи ЭГГ у человека без функциональных нарушений работы голосовых складок (типичная форма), представляет собой «колено» («knee»), характеризуется резким подъемом амплитуды сигнала ЭГГ, небольшим плато в пике амплитуды и чуть менее резким снижением амплитуды сигнала [4] без дополнительных пиков, низкочастотных артефактов и высокочастотных шумов [5]. Форма электроглоттографической волны у пациентов с дисфонией отличается высокой вариабельностью – появлением высокочастотных шумов, дополнительных пиков, низкой амплитудой сигнала [6].

В систематическом анализе 13 исследований, посвященных создании цифровых систем для диагностирования нарушений работы голосовых складок [7], показана высокая точность автоматической классификации ЭГГ пациентов с нарушениями работы голосовых складок и ЭГГ здоровых людей. Лучшие результаты по классификации ЭГГ в бинарной системе норма/патология показали системы, учитывающие мультимодальные сигналы: сигнал ЭГГ + акустический сигнал + анамнез [8-9]. Однако эти работы проведены с использованием методов глубокого машинного обучения, без чёткого описания наборов признаков, лежащих в основе классификации, что создаёт неоднозначность в интерпретации полученных результатов и внедрения методики в клиническую практику.

1 Методика

В исследовании приняли участие 2 группы испытуемых: экспериментальная группа – 7 вокалисток с диагнозом дисфония (30.1±5.2 лет), обусловленная органическими причинами, контрольная группа – 10 вокалисток без выявленных функциональных нарушений работы голосовых складок (средний возраст – 21.7±2.9 лет). Пациентки с диагнозом дисфония на момент регистрации ЭГГ проходили лечение у врача-фониатра.

Регистрация ЭГГ произведена с использованием электроглоттографа Model 7050A (Voce Vista, the Netherlands) при произнесении специального речевого материала. Речевой материал включал в себя кардинальные гласные русского языка: /a/, /i/ и /u/. Два электрода диаметром 2.5 см крепились эластичной лентой вокруг шеи на уровне щитовидного хряща испытуемой в области, где наблюдалась максимальная амплитуда сигнала ЭГГ при произнесении гласного /a/ [10]. Испытуемые произносили изолированные протяжные гласные звуки (не менее 6 секунд) естественным голосом, при этом их просили не менять специально высоту голоса. Регистрацию ЭГГ всех испытуемых проводил один и тот же экспериментатор. Все участницы исследования подписывали информированное согласие, одобренное Этическим комитетом Санкт-Петербургского государственного университета.

Данные ЭГГ проанализированы на основе алгоритмов, заложенных в программе «VoceVista 3.3». Смыканием голосовых складок считали момент времени, когда значения амплитуды сигнала превышали определенный пороговый уровень [11], в качестве порога принимали значение 20% [3].

Проведён статистический анализ с использованием программы «Statistica 12» по критерию Краскела-Уоллиса. Описаны формы электроглоттографических волн вокалисток контрольной и экспериментальной группы.

2 Результаты

2.1. Специфика глоттальных циклов вокалисток экспериментальной группы при произнесении изолированных гласных

На основании алгоритмов, заложенных в программе «VoceVista 3.3», определены значения ЧОТ и CQ для более 90% глоттальных циклов вокалисток контрольной группы при заданном уровне порогового значения 20%, вне зависимости от типа гласного. В экспериментальной группе количество таких глоттальных циклов различалось для разных вокалисток и гласных (за исключением пациентки Н33, после операции по удалению узелков на голосовых складках) (табл. 1).

Таблица 1

Количество глоттальных циклов испытуемых экспериментальной группы, для которых определены значения ЧОТ и CQ, %

Испытуемая	/a/	/i/	/u/
М31	59%	75%	42%
Э23	4%	10%	6%
Н33	100%	100%	100%
Л31	56%	77%	85%
В39	6%	83%	19%
А28	25%	10%	11%
А26	—	—	—

2.2. Значения ЧОТ вокалисток при произнесении изолированных гласных

На основе анализа электроглоттограмм испытуемых показано, что значения ЧОТ при произнесении гласных /u/ и /i/ выше, чем при произнесении гласного /a/ ($p<0.05$ – различия между гласным /a/ и другими гласными в экспериментальной группе и $p < 0.05$ – различия между гласными /a/ и /u/, $p < 0.001$ – различия между гласными /a/ и /i/ в контрольной группе).

Не выявлено различий по значениям ЧОТ между вокалистками контрольной и экспериментальной групп.

2.3. Значения CQ вокалисток при произнесении изолированных гласных

Значения коэффициента CQ при произнесении гласного /i/ выше, чем при произнесении других гласных ($p < 0.05$ в экспериментальной группе и $p < 0.001$ в контрольной группе) (рис. 1, *б*).

Не выявлено различий по значениям CQ между вокалистками контрольной и экспериментальной групп.

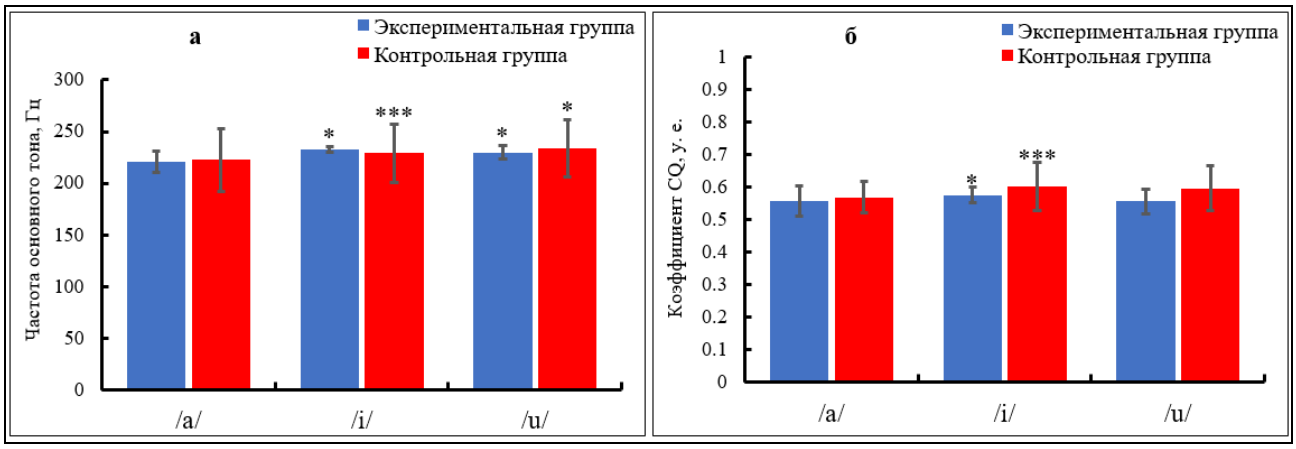


Рисунок. 1. Параметры ЭГГ при произнесении изолированных гласных. а) Значения ЧОТ; б) Значения CQ

*** — $p < 0.001$, * — $p < 0.05$ – критерий Краскелла-Уоллиса.

2.4. Форма электроглоттографической волны

ЭГГ контрольной группы характеризуется преобладанием типичной формы электроглоттографической волны («колено»), при наличии дополнительных шумов для отдельных испытуемых (3 человека), и дополнительных пиков для одной участницы исследования. В экспериментальной группе форма ЭГГ волн варьирует для каждой испытуемой. У испытуемой М31 форма ЭГГ волны отличалась от формы колена только при произнесении гласного /a/ (рис. 2, *а*). У испытуемой А26 полученная ЭГГ волна имела большое количество высокочастотных шумов с высокой амплитудой и дополнительных пиков (рис. 2, *б*), что сделало невозможным анализ CQ и ЧОТ при анализе данных ЭГГ с использованием программного обеспечения «VoceVista 3.3». Наличие подобных шумов для части глоттальных циклов наблюдалось также и для других испытуемых в экспериментальной группе, кроме одной испытуемой – Н33.

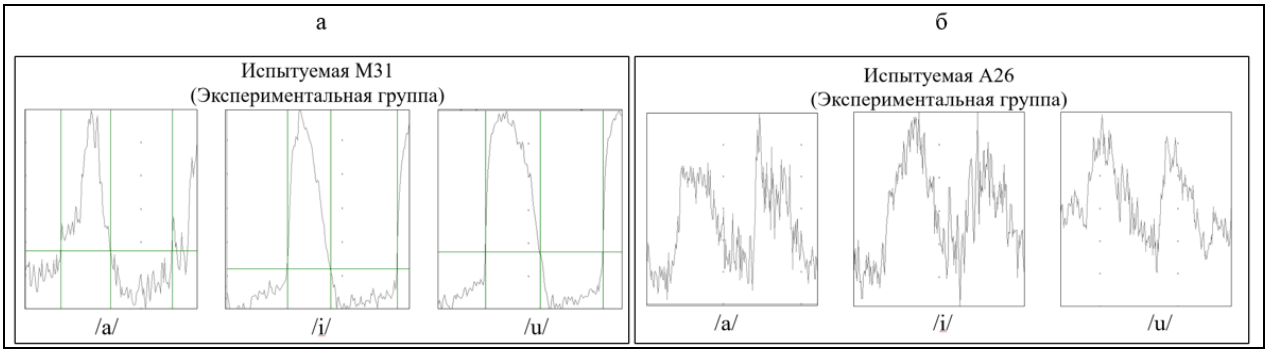


Рисунок. 2. Форма электроглоттографической волны при произнесении изолированных гласных /a/, /i/ и /u/.
а) Испытуемая М31; б) Испытуемая А26.

Заключение

В данном исследовании получены данные о характеристиках работы голосового источника вокалисток без выявленных функциональных нарушений работы голосовых складок и с диагнозом дисфония. Показано, что у вокалисток с диагнозом дисфония значения частоты основного тона и значения коэффициента CQ при произнесении изолированных гласных значимо не отличаются от соответствующих значений вокалисток без выявленных нарушений работы голосовых складок. Показано, что значения частоты основного тона вокалисток как в контрольной, так и в экспериментальной группе при произнесении гласного /a/ ниже, чем при произнесении гласных /i/ и /u/, а значения CQ при произнесении гласного /i/ максимальны, по сравнению с гласными /a/ и /u/. Описаны специфические особенности формы ЭГГ волн у вокалисток с диагнозом дисфония.

Полученные данные в перспективе могут быть использованы для создания неинвазивного метода определения нарушений работы голосовых складок по характеристикам электроглоттограммы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (проект № 25-15-00139).

Список литературы

1. *Щербакова М. М.,* Котов С. В. Введение в медицинскую логопедию. Издательские решения. 2025

2. *Рудин, Л. Б.* Классификация заболеваний и состояний голосового аппарата // Голос и речь. 2013. **9**, № 1. С. 97.

3. *Herbst C.* Electroglottography – An Update // J. Voice. 2020. **34**, N 4. P. 503.

4. *Hess M., Ludwigs M.* Strobophotoglottographic transillumination as a method for the analysis of vocal fold vibration patterns // J. Voice. 2000. **14**, N 2. P. 255.

5. *Lim J., Kim J., Choi S., Kim K., Kim Y., Kim H., Choi H.* Sulcus Configurations of Vocal Folds during Phonation // Acta Oto-Laryngologica. 2009. **129**, N10. P. 1127.

6. *Nacci, A., Macerata, A., Bastiani, L., Paludetti, G., Galli, J., Marchese, M. R., Barillari, M. R., Barillari, U., Laschi, C., Cianchetti, M.* et al. Evaluation of the Electroglottographic Signal Variability in Organic and Functional Dysphonia. Journal of Voice 2022, **36**, N 6. P. 881.e5.

7. *Tomaszewska J. Z., Georgakis A.* Electroglottography in Medical Diagnostics of Vocal Tract Pathologies: A Systematic Review. Journal of Voice. 2023. Article in Press

8. *Miliaresi, I. Pikrakis, A. Poutos, K.* A Deep Multimodal Voice Pathology Classifier with Electroglottographic Signal Processing Capabilities // 7th IEEE International Conference on Frontiers of Signal Processing. 2022. P. 109.

9. *Geng L., Lian Y., Shan H., Xiao Z., Wang W., Wei M.* Pathological Voice Detection and Classification Based on Multimodal Transmission Network // J. Voice. 2022. **39**, N 3. P. 591

10. *Tang S., Zhang C., Wang S., Wan M.* A Preliminary Study for a Slantwise-Placed Electroglottography // J. Voice. 2015. **29**, N 1. P. 129.

11. *Rothenberg M., Mahshie J.* Monitoring Vocal Fold Abduction through Vocal Fold Contact Area // J. Speech, Language, and Hearing Research. 1988. **31**, N 3. P. 338.

УДК: 534.78; 612.78 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39708

Характеристики эмоциональной речи детей с синдромом Дауна в возрасте 8-11 лет

П.С. Турченко[1,a], Е.Е Ляксо[1,b]

[1)] Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034
E-mail: [a]st133295@student.spbu.ru, [b]lyakso@gmail.com

Работа выполнена с целью сравнения перцептивных и акустических характеристик эмоциональной речи типично развивающихся (ТР) детей и их сверстников с синдромом Дауна (СД) с разными условиями воспитания. В исследовании приняло участие 25 детей в возрасте 8-11 лет: 15 детей с СД – 10 детей, воспитывающихся в условии семьи, 5 детей – в условиях детского дома, и 10 ТР детей (контрольная группа). Аудиозапись речи детей проведена при тестировании по методике «Child Emotional Development Method» (CEDM). Для перцептивного эксперимента 5 экспертов провели аннотирование речевого материала по 4 категориям эмоциональных состояний: «радость – нейтральное состояние – печаль – гнев». Из аннотированных фрагментов речи составлены тестовые последовательности для каждой группы детей, которые предъявляли 5 аудиторам для определения возможности распознавания взрослыми эмоционального состояния детей. Спектрографический анализ речевого материала, включенного в аудио тест, проводили с использованием программы «Cool Edit Pro v2.1»: измеряли частоту основного тона (F0, её максимальное и минимальное значения), интенсивность (E0), значения формант (F1, F2). Показаны различия перцептивных и акустических характеристик эмоциональной речи между детьми с СД, воспитывающихся в разных условиях, и их ТР сверстниками.

Ключевые слова: синдром Дауна, младший школьный возраст, эмоциональная речь, перцептивный эксперимент, спектрографический анализ.

Characteristics of emotional speech in children with Down syndrome aged 8-11 years

P.S. Turchenko[1,a], E.E. Lyakso[1,b]

[1)] Department of Higher Nervous Activity and Psychophysiology, Faculty of Biology, Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, 199034, Russia
E-mail: [a]st133295@student.spbu.ru, [b]lyakso@gmail.com

This study aimed to compare the perceptual and acoustic characteristics of emotional speech in typically developing (TD) children and their peers with Down syndrome (DS) with

different upbringing conditions. 25 children aged 8-11 years participated in the study: 15 children with DS (10 children raised in family settings, 5 children in an orphanage), and 10 TD children (the control group). The children's speech was recorded during testing using the Child Emotional Development Method (CEDM). For the perceptual experiment, five experts annotated the speech material into four categories of emotional states: "joy - neutral - sadness - anger." Test sequences for each group of children were created from the annotated speech fragments and presented to five auditors to determine adults' ability to recognize the children's emotional states. Spectrographic analysis of the audio test's speech material was conducted using Cool Edit Pro v2.1 software. Pitch values (F0) average, maximum and minimum, intensity (E0), and values of two first formant (F1, F2) were determined. Differences in the perceptual and acoustic characteristics of emotional speech and between children with DS raised in different conditions and TD children were revealed.

Keywords: Down syndrome, primary school age, emotional speech, perceptual experiment, spectrographic analysis

PACS: 43.70.+i; 43.71+m.

1 Введение

Синдром Дауна (СД) – это одна из распространенных геномных патологий, при которой когнитивные нарушения выявляются в том числе в речевой сфере [1]. Наблюдаемые общая гипотония, гипоплазия верхней челюсти с относительной макроглоссией, дисморфология неба, ларингомаляция, короткая шея и другие отличия могут влиять на акустические характеристики речи [2,3].

В исследованиях, проведенных на базах различных языков, показано, что речевой профиль детей с СД неоднородный и с высоким уровнем индивидуальной изменчивости. Описывают данные о строении речевого аппарата и перцептивных и акустических характеристик голоса (формы фонационной дисфункции, атипичного резонанса) [4]. Данные о скорости речи, значениях частоты основного тона (ЧОТ) – противоречивы. На материале русского языка исследования эмоциональной речи детей с СД единичны [5,6].

Цель исследования – выявить особенности перцептивных и акустических характеристик эмоциональной речи типично развивающихся (ТР) детей и их сверстников с синдромом Дауна с разными условиями воспитания.

2 Методика

В исследовании приняли участие 25 детей в возрасте 8-11 лет: 15 детей с СД – 10 детей, воспитывающихся в условии семьи (10.0 ± 1.2 лет), 5 детей – в условиях детского дома (10.4 ± 0.5 лет), и 10 ТР детей как контрольная группа (9.6 ± 0.7 лет).

Аудиозапись речи производили на магнитофон «Marantz PMD660» с выносным микрофоном «SENNHEIZER e835S» при стандартизированных ситуациях по методике CEDM [7] – беседа ребенка с экспериментатором, игра с игрушками, просмотр ребенком картинок и ответы на вопросы по ним. Речевые файлы сохраняли в формате Windows PCM WAV, 48000 Гц, 16 бит.

Для оценки отражения эмоциональных состояний детьми и возможности взрослых (аудиторов, n=5, возраст - 24.9 ± 1.7 лет) распознавать их по голосу провели перцептивный эксперимент. Предварительно 5 экспертов провели аннотирование речевого материала по 4 категориям эмоциональных состояний: «радость – нейтральное состояние – печаль – гнев». Из аннотированных фрагментов речи с уровнем согласия между экспертами не менее 0.8 составлены тестовые последовательности. Тестовые последовательности включали в себя 40 речевых фрагментов (фразы, слова) для группы ТР детей, 80 – для детей с СД, воспитывающихся в семьях, 20 – для детей с СД, воспитывающихся в детском доме. Интервал между сигналами – 5 с, каждый сигнал предъявляли один раз.

Спектрографический анализ речевого материала, включенного в аудио тест, проводили с использованием программы «Cool Edit Pro v2.1». Измеряли значения частоты основного тона (F0), максимальное (F0 max), минимальное (F0 min) для высказывания, слова, ударного гласного в слове, стационарного участка гласного, значения интенсивности (E0). Считали диапазон ЧОТ как разность между ее максимальными и минимальными значениями [F0max-F0min], относительную интенсивность (E0max /E0min) для высказывания, слова, ударного гласного в слове, стационарного участка гласного. На стационарном участке гласных /a/, /u/, /i/ определяли значения первых двух формант (F1, F2); по данным значениям строили формантные треугольники и считали их площадь.

2 Результаты

По речи ТР детей аудиторы лучше определяли состояние радости (74% - правильные ответы аудиторов), хуже – состояние гнева (0%). По речи детей с СД, воспитывающихся в семье, аудиторы лучше определяли состояние печали (60%) и гнева (59%), хуже – нейтральное состояние (44%); по речи детей с СД, воспитывающихся в детском доме (ДД) – лучше определяли радость (72%) и гнев (70%), хуже – нейтральное состояние (40%). Состояние радости аудиторы чаще всего путали с нейтральным состоянием (34%) в группе детей с СД, воспитывающихся в семье, нейтральное состояние – с радостью (28%) и печалью (28%) в группе детей с СД, воспитывающихся в ДД, печаль и гнев с нейтральным состоянием (53% и 70% соответственно) в группе ТР детей.

Аудиторы с наибольшей точностью в группах ТР детей распознавали радость (0.83), в группе детей с СД, воспитывающихся в семье – состояние гнева (0.74), в группе детей с СД, воспитывающихся в семье и в ДД, - состояние гнева (0.74 и 0.76 соответственно) (табл. 1).

Таблица 1

Распознавание эмоциональных состояний аудиторами по речи детей (%)

	Радость			Нейтральное			Печаль			Гнев		
	ТР	СД	СД ДД	ТР	СД	СД ДД	ТР	СД	СД ДД	ТР	СД	СД ДД
Радость	**74**	**52**	**72**	22	34	20	0	3	0	4	11	8
Нейтральное	14	27	28	**66**	**44**	**40**	20	22	28	0	7	4
Печаль	1	3	0	53	34	30	**46**	**60**	**60**	0	3	10
Гнев	0	9	20	70	17	10	30	15	0	**0**	**59**	**70**
Полнота	0.74	0.52	0.72	0.66	0.44	0.40	0.46	0.60	0.60	0.00	0.59	0.70
Точность	0.83	0.57	0.60	0.31	0.34	0.40	0.48	0.60	0.68	0.00	0.74	0.76
F1-score	0.78	0.54	0.65	0.42	0.38	0.40	0.47	0.60	0.64	-	0.66	0.73
UAR	ТР = 0.47; СД = 0.54; СД ДД=0.61											

Представлены отличия акустических характеристик при сравнении групп ТР детей с детьми с СД, воспитывающихся в семье и в ДД, показаны значения p по критерию Манна-Уитни (табл. 2). Наибольшее количество отличающихся параметров у группы детей с СД представлено в состоянии гнева, у группы детей с СД, воспитывающихся в ДД, – в состоянии печали.

Таблица 2

Различия между детьми разных групп по акустическим характеристикам речи (критерий Манна-Уитни)

Акустические Характеристики	Радость			Нейтральное			Печаль			Гнев		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
$T_{высказ}$	.043			.003	.003		.009	.019				
$T_{сл}$	.001											
$T_{уд\ гл}$	.003	.001		.043	.014		.001					
$F0_{сл}$								.004	.006	.004	.038	
$F0_{уд\ гл}$								.003	.003	.009	.038	
$F0_{ст\ уд\ гл}$								.002	.004	.026	.022	
F0 $max_{сл}$								.006	.007	.006	.007	
F0 $max_{уд\ гл}$								.001	.003	.012	.007	
F0 $min_{сл}$								.005	.006			
F0 max- F0 $min_{сл}$										.026	.003	
F0 max- F0 $min_{ул\ гл}$								.004	.011	.041	.004	
E max/$E0_{сл}$										.014	.038	
E max/$E0_{уд\ гл}$	.030							.014	.014	.045		
E min/$E0_{сл}$								.031	.031			
E min/$E0_{уд\ гл}$	.007	.009						.001	.001			

Цифрами обозначены сравниваемые группы детей: 1 - ТР/СД, 2 - ТР/СД ДД, 3 – СД/СД ДД

Значение площади формантных треугольников (рис. 1) ударных гласных из слов ТР детей выше (173752 усл. ед), чем у детей с СД, воспитывающихся в ДД (132419 усл. ед.) и в семье (98236 усл. ед.).

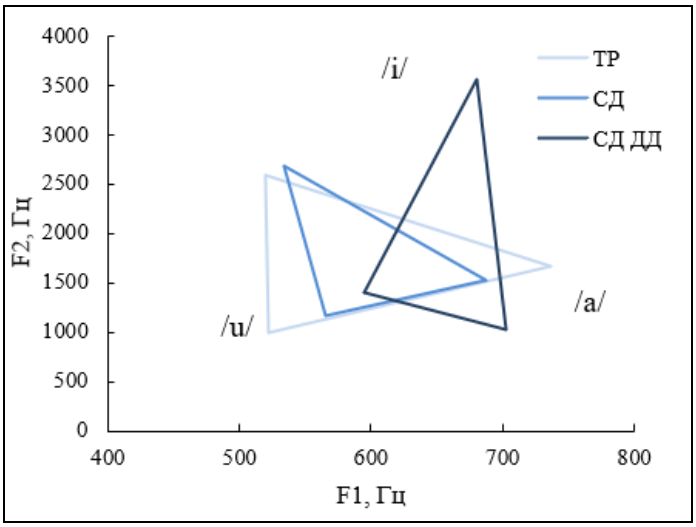


Рисунок 1. Формантные треугольники ударных гласных /a/, /i/, /u/ из слов ТР детей и детей с СД, воспитывающихся в семье и в детском доме.

Формантный треугольник ударных гласных детей с СД (рис. 1), воспитывающихся в семье, более централизован по сравнению с группой ТР детей. Формантный треугольник ударных гласных детей с СД из ДД наиболее деформирован: значение F1 гласного /i/ смещено в высокочастотную область, значения F2 гласного /a/ – в низкочастотную область.

У детей с СД, воспитывающихся в семье, F2 для ударной гласной /a/ в состоянии печали было достоверно выше ($p < 0.023$) по сравнению с детьми с СД, воспитывающихся в ДД, F2 для ударной гласной /u/ в состоянии печали – достоверно выше ($p < 0.030$) по сравнению с ТР детьми.

4 Заключение

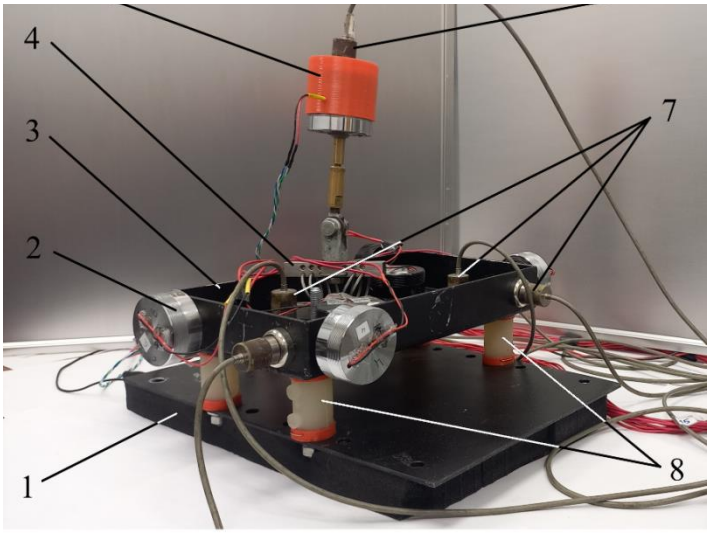
В работе определены различия в перцептивных и акустических характеристиках эмоциональной речи ТР детей и детей с СД, воспитывающихся в разных условиях. Наибольшее количество различий детей с СД и ТР детей выявлено в состояниях печали и гнева, что демонстрирует специфичность данных эмоциональных состояний у детей с СД. У детей с СД, воспитывающихся в семье, определены различия в значениях двух первых формант. Это находит отражение в форме и расположении формантных треугольников ударных гласных на двухформантной плоскости. Результаты перцептивного эксперимента показывают, что по речи ТР детей и детей с СД, воспитывающихся в семье, аудиторы лучше распознают радость, по речи детей с СД, воспитывающихся в ДД – гнев, что может отражать влияние различных условий воспитания.

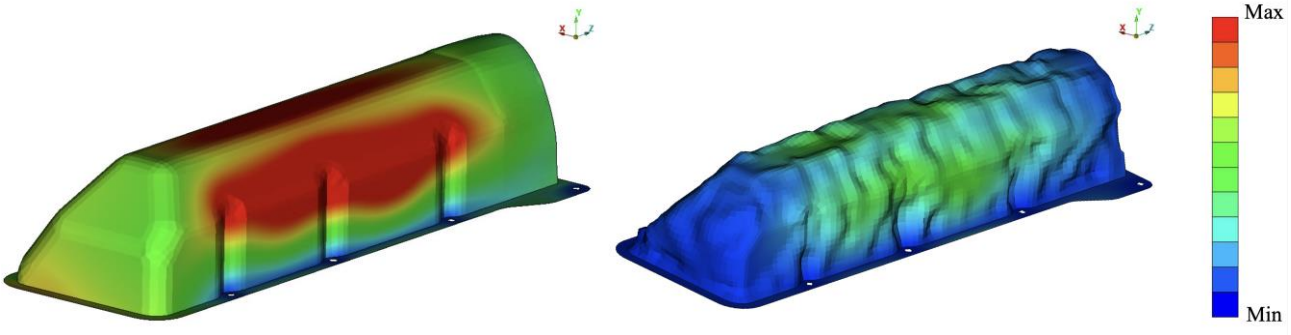
Список литературы

1. *Windsperger K., Hoehl S.* Development of Down Syndrome Research Over the Last Decades-What Healthcare and Education Professionals Need to Know // Front Psychiatry. 2021. 2. 749046.
2. *Moura C.P., Cunha L.M., Vilarinho H., Cunha M.J, Freitas D., Palha M., Pueschel S.M., Pais-Clemente M.* Voice Parameters in Children With Down Syndrome // Journal of Voice. 2008. **22**, N 1, P. 34.
3. *Vorperian H.K., Kent R.D., Lee Y., Buhr K.A.* Vowel Production in Children and Adults With Down Syndrome: Fundamental and Formant Frequencies of the Corner Vowels //Journal of speech, language, and hearing research: JSLHR. 2022. **66**, N 4. P. 208.
4. *Kent R.D., Vorperian H.K.* Speech impairment in Down syndrome: A Review / R. D. Kent, H. K. Vorperian // J. of Speech, Language, and Hearing Res. 2013. N 1, P. 178.
5. *Городный В.А., Лякco Е. Е.* Характеристика речи детей 6–7 лет с расстройствами аутистического спектра и синдромом дауна // Теоретическая и прикладная лингвистика. 2018. **4**, №2. С. 22.
6. *Лякco Е.Е., Фролова О.В., Николаев А.С., Городный В.А., Григорьев А.С.* Распознавание взрослыми эмоционального состояния детей по характеристикам их речевых сигналов // Проблемы онтолингвистики— 2021: языковая система ребенка в ситуации одно- и многоязычия. Материалы ежегодной Международной научной конференции. СПб. ВВМ, 2021. С. 108.
7. *Lyakso E., Frolova O., Kleshnev E., Ruban N., Mekala A.M., Arulalan K.V.* Approbation of the Child's Emotional Development Method (CEDM) // ICMI '22 Companion: Companion Publication of the 2022 International Conference on Multimodal Interaction. 2022. P. 201.

Назад к содержанию секции

СЕКЦИЯ ШУМЫ И ВИБРАЦИИ





назад к Содержанию

СОДЕРЖАНИЕ СЕКЦИИ ШУМЫ И ВИБРАЦИИ

1. ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПОДВЕСОК СУДОВЫХ ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ
Волкова Н.В., Волкова М.В., Крылов А.В., Кузьменко П.А.....1359

2. ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ИСПЫТАНИЙ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АМОРТИЗИРУЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ
Кузьменко П.А., Налимова Т.Г., Иванов С.А., Семкин В.Г. 1365

3. СРАВНЕНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ГАСИТЕЛЕЙ ВИБРАЦИИ ОДНОМЕРНЫХ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ, ОПИРАЮЩИХСЯ НА СПЛОШНОЕ УПРУГОЕ ОСНОВАНИЕ
Ерофеев В.И., Лисенкова Е.Е. 1366

4. УНИФИЦИРОВАННАЯ ПРОГРАММНО-АППАРАТНАЯ СИСТЕМА АКТИВНОГО ГАШЕНИЯ СЛУЧАЙНЫХ ШИРОКОПОЛОСНЫХ ВИБРАЦИЙ
Карасева В.А., Львов А.В., Окунев А.Г., Рязапов Р.Р.....1367

5. ОСОБЕННОСТИ ВИБРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИГОРОДНЫХ ПОЕЗДОВ ПРИ ДВИЖЕНИИ С ВЫСОКОЙ СКОРОСТЬЮ
Цукерников И.Е., Невенчанная Т.О., Шубин И.Л., Щурова Н.Е., Тихомиров Л.А. .1373

6. НОВЫЕ НАЦИОНАЛЬНЫЕ СТАНДАРТЫ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ПОМОЩЬЮ ИНТЕНСИМЕТРИИ
Цукерников И.Е., Невенчанная Т.О., Шубин И.Л., Щурова Н.Е., Тихомиров Л.А. .1375

7. АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ШУМОЗАЩИТНЫХ ЭКРАНОВ, КАК ОДНОГО ИЗ СПОСОБОВ СНИЖЕНИЯ ШУМА В ЗАСТРОЙКЕ МОСКВЫ
Гончаренко И.А., Кирюшина Н.К., Пузакова А.И., Токарева А.М. 1377

8. ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЗВУКОИЗОЛИРУЮЩЕЙ ОБЛИЦОВКИ ГАЗОПРОВОДА
Ягло М.А., Пименов И.К., Петров М.И. 1383

9. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШУМОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УЗЛОВ И АГРЕГАТОВ АВТОМОБИЛЯ «КАМАЗ»
Павлов Г.И., Ситников О.Р., Гусев А.Л., Поляев А.В. 1384

10. СНИЖЕНИЕ ШУМА СИЛОВОГО АГРЕГАТА НА ОСНОВЕ РАСЧЕТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
Тяка Е.Ф., Рахматов Р.И. 1391

11. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ ПРИ ОЦЕНКЕ ТРАНСПОРТНОГО ШУМА
Бояршинов М.Г., Щелудяков А. М. 1398

12. ОСОБЕННОСТИ ПОГЛОЩЕНИЯ ЗВУКА РЕЗОНАТОРОМ ГЕЛЬМГОЛЬЦА
Комкин А.И., Миронов М.А., Быков А.И. 1401

13. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАТОРА ГЕЛЬМГОЛЬЦА НА СТЕНКЕ КАНАЛА С ПОТОКОМ
Комкин А.И., Матасова О.Ю., Карнаухова Л.С. 1407

14. ПАССИВНЫЕ СИСТЕМЫ ШУМОПОДАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ РЕЗОНАНСНЫХ СТРУКТУР
Бикмухаметов Ф.Р., Никитин В.В., Бучкин И.К., Рожин А.М., Красиков С.Д., Красикова М.В. 1413

УДК: 534. DOI: 10.34756/GEOS.2026.17.39709

Перспективы применения новых материалов для подвесок судовых трубопроводных систем

Н.В. Волкова[1,a], М.В. Волкова[1,a], А.В. Крылов[1,a], П.А. Кузьменко[1,a]

[1] *ФГУП «Крыловский государственный научный центр».*

196158 Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44.

E-mail: [a]krylov6@ksrc.ru

Аннотация: При проектировании судов в процессе создания амортизирующих креплений судовых трубопроводных систем используются виброизолирующие подвески. Рассмотрены перспективы использования новых материалов при создании эффективных виброизолирующих подвесок с улучшенными акустическими характеристиками и ресурсными параметрами.

Ключевые слова: трубопроводная система, подвеска, упругий элемент, резина, полиуретан, силикон

Prospects for the use of new materials for ship pipeline systems

N.V. Volkova[1,a], M.V. Volkova[1,a], A.V. Krylov[1,a], P.A. Kuzmenko[1,a]

[1] *Krylov State Research Center.*

St. Petersburg 196158, Russia.

E-mail: [a]krylov6@ksrc.ru

Abstract: In ship design, vibration-isolating hangers are use to create shock-absorbing mounts for ship pipeline systems. The article discusses the prospects for using new materials to create effective vibration-isolating suspensions with improved acoustic characteristics and resource parameters.

Keywords: pipeline system, suspension, elastic element, rubber, polyurethane, silicone

PACS: 01.40 gf

Введение

Исследования по совершенствованию и снижению виброактивности современных судовых машин и механизмов, созданию для них эффективных амортизирующих конструкций, а также более совершенных схем амортизирующих креплений привели к тому, что определяющей в формировании акустических параметров помещений современных судов становится акустическая энергия, распространяющаяся по судовым трубопроводным системам.

По трубопроводам акустическая энергия распространяется как по рабочей среде (гидродинамический шум), так и по структуре (вибрация). По судовым конструкциям эта

энергия передается в основном через узлы крепления трубопроводов к корпусным и внутрикорпусным конструкциям. Для снижения этого явления во всех местах контакта трубопроводов с судовыми конструкциями необходимо использовать соответствующие средства виброизоляции - виброизолирующие подвески.

1 Требования, предъявляемые к подвескам трубопроводных систем

Виброизолирующие подвески должны удовлетворять ряду требований, которые подробно изложены, например, в [1]. Остановимся на основных из них.

Данные конструкции должны обеспечивать надежное крепление, в определенном положении, трубопроводов к несущим судовым конструкциям, не допуская значительных перемещений и обеспечивая устойчивость трубопроводов, воспринимать и равномерно распределять нагрузки, не допуская разрушения при эксплуатационных воздействиях, которые могут быть статическими, квазистатическими и динамическими.

К статическим относятся нагрузки, которые действуют постоянно в течение всего срока службы, с момента монтажа амортизированного трубопровода: нагрузки от веса собственно участка трубопровода и нагрузки, возникающие при длительном крене и дифференте судна.

Вес участка трубопровода с рабочей средой P определяется в соответствии с зависимостью

$$P = \pi \cdot r \cdot (2 \cdot t \cdot \rho_{cm} + r \cdot \rho_{cp}) \cdot L,$$

где r - радиус трубопровода;

t - толщина стенки трубопровода;

ρ_{cm} - удельный вес материала стенок трубопровода;

ρ_{cp} - удельный вес рабочей среды трубопровода;

L - длина участка трубопровода.

С учетом веса фланцев и других элементов арматуры, полученные величины необходимо увеличить в 1,5 раза.

Кратковременные нагрузки, возникающие при крене и дифференте судна, определяются максимально допустимыми углами крена и дифферента: $P_x = P_y = P_z \cdot \sin 45^0 = 0{,}707 \cdot P_z$ с длительностью в зависимости от района плавания судна и режима его эксплуатации.

Медленно меняющиеся во времени нагрузки, возникающие при качке судна на волнении и при смене режима работы оборудования, относятся к квазистатическим нагрузкам. Так как значения ускорения при качке не превышают величины ускорения свободного падения, то добавочные нагрузки при качке могут достигать действующих статических нагрузок на подвеску. Длительность указанных нагрузок определяется возможными районами плавания судна и режимами его эксплуатации. Частота квазистатического воздействия определяется

частотой качки судна на волнении и для типовых подвесок целесообразно принимать частоту в диапазоне (0,1 - 0,15) Гц.

К динамическим нагрузкам на подвески относятся длительные вибрационные нагрузки, обусловленные работой элементов трубопроводной системы и вибрацией несущих судовых конструкций. Эти нагрузки действуют в течение всего периода плавания судна. Кроме этого, к динамическим нагрузкам относятся разовые, кратковременные нагрузки, возникающие при толчках и ударах судна в ходе эксплуатации.

2 Существующие подвески судовых трубопроводных систем

Для удовлетворения вышеперечисленным требованиям значительный промежуток времени успешно применялись виброизолирующие подвески тип VI [2], упругий элемент (УЭ), которых выполнялся из перфорированной резины, намотанной в нескольких слоев на трубопровод и поджатой хомутом.

В ходе дальнейших работ по улучшению виброизолирующих свойств созданы подвески ПТАК (УЭ - резиновая прокладка) [3], ПТАП (УЭ - пластинчатая пружина S-образной формы) [3], ПТАКСС (УЭ - амортизатор АКСС-И) [2] и ПВС (УЭ - разрезанное кольцо с продольными круглыми в сечении отверстиями) [2].

Однако виброизолирующая эффективность указанных подвесок невысока, а их монтаж на трубопроводные системы достаточно сложен. Поэтому для дальнейшего снижения вибрационной энергии, передаваемой на несущие конструкции по судовым трубопроводам водяных, воздушных и гидравлических систем разработаны компактные подвески виброизолирующие малогабаритные зубчатые ПВМЗ [4], которые представляют собой сборную конструкцию, состоящую из унифицированного УЭ, охватывающего трубопровод по наружной поверхности, и фиксируемого с помощью полухомутов с элементами крепления. В случае необходимости изменения жесткостных характеристик подвески УЭ можно перевернуть другой стороной по отношению к трубопроводу.

Применение указанных подвесок со сниженной вибрационной жесткостью и собственной частотой обеспечивает повышенную виброизолирующую эффективность. Для экспериментальной оценки эффективности ПВМЗ произведены замеры перепадов вибрации на трубопроводе *Dн*38 на штатном режиме работы виброактивной судовой системы – системы охлаждения оборудования в диапазоне частот 5 - 1000 Гц в третьоктавных полосах частот, результаты которых при раскреплении трубопроводов двумя способами – при помощи ПВМЗ и ПТАКСС-25 приведены на рис. 1. Как видно из рис. 1, эффективность подвески ПВМЗ на 10 - 15 дБ превосходит эффективность широко используемой ПТАКСС и, тем более, тип VI.

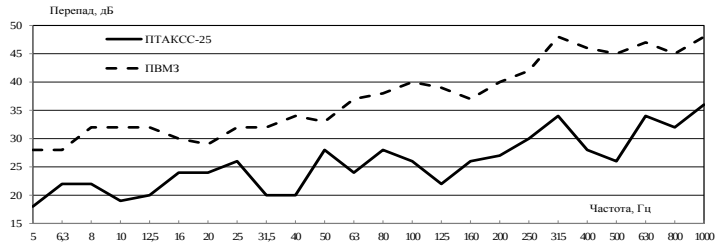


Рисунок 1 - Значения перепадов вибрации на подвесках ПВМЗ и ПТАКСС, установленных на трубопроводе с наружным диаметром 38 мм.

3 Перспективные материалы для подвесок судовых трубопроводных систем

Перспективным направлением дальнейшего совершенствования и развития виброизолирующих подвесок судовых трубопроводных систем является внедрение новых материалов, которые позволят обеспечить достаточную виброизолирующую эффективность и функциональную надежность изделий.

Для изготовления УЭ подвесок судовых трубопроводных систем традиционно используются резины специальных марок. Однако, предъявляемые в настоящее время требования по эксплуатационным воздействиям, пожароопасности и санитарно-токсикологическим показателям перспективных амортизирующих конструкций приводят к необходимости поиска новых материалов с уникальными свойствами и характеристиками.

Выполненные в ФГУП «Крыловский государственный научный центр» исследования показали, что существует ряд полиуретановых материалов, близких или превосходящих по своим показателям марки резин, штатно применяемых в виброизолирующих конструкциях. Изучено и экспериментально исследовано значительное количество полиуретановых составов и силиконовых резин, обладающих разными физико-механическими, упруго-гистерезисными, акустическими, эксплуатационными и другими свойствами.

Также исследованы новые марки полиуретановых композиций и силиконовые резины - эластомеры, получаемые на основе высокомолекулярных кремнийорганических соединений и по внешнему виду напоминающие резину, но обладающие рядом уникальных свойств. По результатам исследований выявлена резина силиконовая Пентасил, обладающая всеми требуемыми свойствами и представляющая собой композицию метилвинилсилоксанового каучука, наполнителя и антиструктурирующих компонентов. Данный материал целесообразно использовать в УЭ подвесок систем вентиляции, кондиционирования и очистки воздуха.

Результаты определения физико-механических и динамических характеристик

полиуретановых композиций Сурэл [5], силиконовой резиновой смеси Пентасил [6] и резины ИРП-2025 приведены в таблице 1.

Таблица 1

Физико-механические характеристики эластомерных материалов

Марка материала	Условная прочность при растяжении σ_p, МПа	Относительное удлинение при разрыве ε_p, %	Остаточное удлинение после разрыва $\varepsilon_{ост}$, %	Твёрдость, ед. ШорА	Модуль сдвига в диапазоне частот 7,8 - 500 Гц, МПа
полиуретановая композиция Сурэл (рецепт 1)	12,3	710,6	9	57-58	0,95-2,00
полиуретановая композиция Сурэл (рецепт 2)	12,7	727,7	22	43-44	0,7-1,5
силиконовая резиновая смесь Пентасил	9,6	561,0	5	43-44	0,75-1,6

Как видно из таблицы 1, силиконовые резины не обладают высокой механической прочностью по сравнению с полиуретанами, что связано с особенностями строения и химической природой этого класса материалов. Однако силиконы сохраняют свои свойства практически неограниченное время при температурах от минус 50ºС до плюс 180ºС, то есть их свойства в меньшей степени зависят от температуры, чем у других полимерных материалов. К таким свойствам относятся, например, эластичность, упругость, прочность, жёсткость и относительное удлинение.

Кроме этого, все указанные в таблице 1 материалы обладают лучшими по сравнению с резинами пожароопасностью и санитарно-токсикологическим показателями.

Известно [7], что зависимость динамических свойств эластомеров от температуры обратна их изменению от частоты (температурно-частотные зависимости свойств резин). Таким образом, поскольку свойства силиконовых резин практически не изменяются в зависимости от температуры, то и в зависимости от частоты (в определенном частотном диапазоне) они изменяются меньше по сравнению со штатными резинами и полиуретанами.

Выполненные измерения остаточной деформации при сжатии в соответствии с ГОСТ ИСО Р 815-1 образцов штатных резин и силиконовых резиновых смесей Пентасил. показали, что силиконовые резины обладают меньшей остаточной деформацией

(менее 2,5%) по сравнению со штатными резинами. Этот факт свидетельствует о том, что силиконы лучше возвращаются к первоначальной форме после сжатия.

Процессы изготовления изделий из различных эластомерных материалов отличаются, Изделия из резин и силиконов изготавливаются прессованием, а полиуретаны свободной заливкой в формы.

Проведенные исследования показали, возможность прогнозирования основных характеристик и параметров создаваемых судовых подвесок трубопроводных систем с УЭ новых эластомерных материалов: полиуретана и силиконовых резин. Осуществленные предварительные оценки показали, что в области низких частот виброизолирующая эффективность подвесок с УЭ из силиконов выше, чем у подвесок из полиуретановых композиций.

Заключение

Возможным направлением совершенствования виброизолирующих подвесок трубопроводных систем является применение новых материалов, появившихся в последние годы. Выполненные исследования показали, что в качестве перспективных материалов взамен штатным резинам можно рекомендовать полиуретановые композиции и силиконовые резины. Следует отметить, что для изделий, испытывающих многократные циклические нагружения и постоянные перепады температур, а также работающих в диапазоне низких частот целесообразнее использование силиконовых эластомеров.

Список литературы

1. *Volkova N., Golovanov V.* Vibration isolating pipe suspensions for ships. // Proceedings of 8th International Conferrence Navy And Shipbuilding Nowadays, NSN`2015. P.125 – 129.
2. ОСТ 5Р.5398-83. Подвески трубопроводов амортизирующие. Типы, основные параметры и размеры [Текст]. – Введ. 1985-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1983.
3. *Попинов В.Р.* Судовые амортизирующие виброизолирующие и противоударные конструкции. СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2014.
4. Патент на полезную модель № 140226. Виброизолирующая подвеска трубопровода [Текст] / Волкова Н.В., Голованов В.И., Иванов В.Г., Ионов А.В., Никишов С.Ю., (РФ). Патентообладатель ФГУП «Крыловский государственный научный центр».
5. ТУ 2253-001-13175942-2006 Композиция уретановая Сурэл-7. Технические условия.
6. ТУ 2512-077-40245042-2004 Смеси резиновые силиконовые марок Пентасил-1402, -1405… Технические условия.
7. *Ионов А.В.* Средства снижения шума и вибрации на судах. – СПб.: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2000.

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39710

Влияние режимов испытаний на динамические характеристики амортизирующих конструкций

Кузьменко П.А.[1)], Налимова Т.Г.[1)], Иванов С.А.[1)], Семкин В.Г.[1)]

1) ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург

Тел.: +7(812)415-49-62, +7(812)415-65-58; Факс: +7(812)386-67-43;

E-mail: krylov6@ksrc.ru

Для снижения интенсивности вибрационных возмущений, передаваемых от работающего оборудования на несущие конструкции, применяются амортизирующие конструкции (АК). В процессе эксплуатации на АК воздействуют различного вида нагрузки: статические и динамические. При выборе АК в состав креплений под оборудование учитываются их характеристики, которые получают экспериментально. Рассмотрены виды воздействий на АК и эквивалентные им режимы испытаний. Проанализировано влияние режимов испытаний АК на их динамические характеристики.

Ключевые слова: динамические характеристики, амортизирующая конструкция, режим испытаний, скорость, деформирование

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39711

Сравнение конструктивных особенностей гасителей вибрации одномерных распределенных элементов конструкций, опирающихся на сплошное упругое основание

Ерофеев В.И.[1)], Лисенкова Е.Е.[1)]

[1)] Институт проблем машиностроения РАН – филиал ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова – Грехова Российской академии наук», Нижний Новгород;
Тел.: +7(831)432-0300; Факс: +7(831)432-0300\); E-mail: erof.vi@yandex.ru

Рассматриваются поперечные колебания лежащей на упругом основании полуограниченной одномерной распределенной системы, в качестве которой выступают струна и балка, с гасителем на границе. Проанализированы простейшие механические модели вязкоупругого тела, используемого в качестве гасителя (модели Максвелла, Фойхта-Кельвина, Пойнтинга-Томсона и Бюргерса), представляющие собой последовательно и параллельно соединенные пружины и демпферы, с учетом его инерционных свойств. Найдены условия, которым должны удовлетворять параметры гасителя, устраняющего отраженные потоки вибрации и обеспечивающие наименьшую интенсивность колебаний системы: «распределенный элемент конструкции+упругое основание». Установлено, что для гасителей, упруго-демпфирующие элементы которых соединены согласно моделям Бюргерса, Максвелла и Пойнтинга-Томпсона, когда используется пружина при последовательном соединении с элементом Фойхта-Кельвина, существенную роль играет масса гасителя, а именно, согласованного безинерционного гасителя не существует. При использовании моделей Фойхта-Кельвина или Пойнтинга-Томпсона, когда при последовательном соединении с элементом Фойхта-Кельвина используется демпфер, возможно существование безинерционных гасителей, не обладающих упругими свойствами, т.е. «чистых» демпферов, которые полностью поглощают поток вибрации. Коэффициенты вязкого демпфирования при этом зависят от свойств упругого основания распределенной системы.

Ключевые слова: вибрации, балка, упругое основание, гаситель

УДК: 534.83 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39712

Унифицированная программно-аппаратная система активного гашения случайных широкополосных вибраций

В.А. Карасева[1,a], А.В. Львов[1], А.Г. Окунев[1], Р.Р. Рязапов[1]

[1] *Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук, ул. Ульянова 46, Нижний Новгород, 603950, Россия.*
E-mail: [a] verakaraseva@ipfran.ru

Аннотация: Приводятся особенности технической реализации модернизированного устройства регистрации и формирования сигнала с уменьшенной задержкой между входными и выходными сигналами. Устройство применяется в системах активного гашения, функционирующих в широком диапазоне частот. Показаны результаты исследования эффективности подавления вибраций с применением данного устройства. В отличие от экспериментов, выполненных ранее, источник компенсируемых вибраций был установлен на верхней платформе и закреплен с помощью шарнира на тросовом амортизаторе. Применен более мощный источник с присоединенной массой для увеличения амплитуды колебаний платформы. Исследования проводились при случайных широкополосных вибрациях с полосой 60...120 Гц. Уровни вибраций контролировались как на верхней платформе, с помощью датчиков остаточных вибраций, так и на нижней, виброизолированной платформе, с помощью контрольных датчиков. Снижение уровня вибраций достигало 14 дБ во всей полосе и до 20 дБ на отдельных частотах. Проведенные экспериментальные работы показали работоспособность применяемой унифицированной программно-аппаратной системы активного гашения случайных широкополосных вибрационных воздействий в диапазоне частот до одной октавы.

Ключевые слова: система активной виброизоляции, адаптивное шумоподавление

Unified Hardware-Software System for Active Suppression of Random Broadband Vibrations

V.A. Karaseva[1,a], A.V. Lvov[1], A.G. Okunev[1], R.R. Ryazapov[1]

[1] *Federal Research Center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences (IAP RAS). Nizhny Novgorod, 603950, Russia.*
E-mail: [a] verakaraseva@ipfran.ru

Abstract: This paper presents the features of the technical implementation of a modernized signal recording and generation device with reduced delay between input and output signals. The device is used in active cancellation systems operating over a wide frequency range. The results of a study on the effectiveness of vibration suppression using this device are shown. In contrast to previously performed experiments, the source of the compensated vibrations was mounted on the upper platform

and secured using a hinge on a cable vibration isolator. A more powerful source with an attached mass was used to increase the amplitude of the platform oscillations. The studies were conducted under random broadband vibrations in the 60–120 Hz band. Vibration levels were monitored both on the upper platform, using residual vibration sensors, and on the lower, vibration-isolated platform, using control sensors. The vibration level reduction reached 14 dB across the entire band and up to 20 dB at individual frequencies.

The conducted experimental work demonstrated the functionality of the applied unified hardware-software system for active cancellation of random broadband vibration excitations in the frequency range of up to one octave.

Keywords: active vibration isolation system, adaptive noise reduction

PACS: 43.50.Jh (Noise in buildings and general machinery noise), 43.50.Ki (Active noise control)

Введение

Современные тенденции развития промышленности, сопровождающиеся усложнением технологических процессов и ужесточением санитарно-гигиенических норм, повышают требования к виброзащите элементов промышленного оборудования, зданий и сооружений. Вибрации, распространяющиеся от работающих механизмов на фундамент и несущие элементы зданий, являются причиной усталостных разрушений и снижают комфортность жилых, коммерческих и офисных зданий. Традиционным подходом к решению данной проблемы является применение систем пассивной виброизоляции, таких как демпферы, композитные подложки и др. Однако эффективность пассивных методов существенно снижается в области низких частот [1], вследствие чего, применение исключительно систем пассивной виброзащиты может оказаться недостаточным. В отличие от пассивных, активные системы виброзащиты лишены ограничений на нижнюю границу частотного диапазона, что делает их более привлекательными для решения широкого класса задач виброизоляции. Тем не менее, практическая реализация активных систем может быть сопряжена с ограничением на ширину полосы частот эффективного гашения, вызванным задержкой в тракте обработки сигналов, на котором реализована система активного гашения [2].

В данной работе представлен подход к построению системы активного гашения, в котором адаптивная фильтрация опорного сигнала выполняется в системе реального времени, реализованной на программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС), в то время как расчет параметров фильтров осуществляется на ЭВМ общего назначения. Такая архитектура позволяет упростить и удешевить аппаратную часть, и создать унифицированную программно-аппаратную систему активного гашения, применяемую для решения широкого класса задач активного гашения случайных широкополосных вибрационных воздействий.

1 Описание алгоритма активного гашения вибраций

Рассмотрим структурную схему предлагаемой системы активной виброизоляции, приведенную на рис. 1. На схеме показаны: источник компенсируемого акустического излучения “ИСТ” с расположенным рядом с ним опорным датчиком, набор J управляемых излучателей и K датчиков остаточного поля. Штрихпунктирной линией показан формирующий многоканальный фильтр, с выходов которого сигналы подаются на управляемые излучатели. Пунктирными линиями показаны пути распространения вибраций от компенсируемого источника и от управляемых излучателей до датчиков остаточного поля.

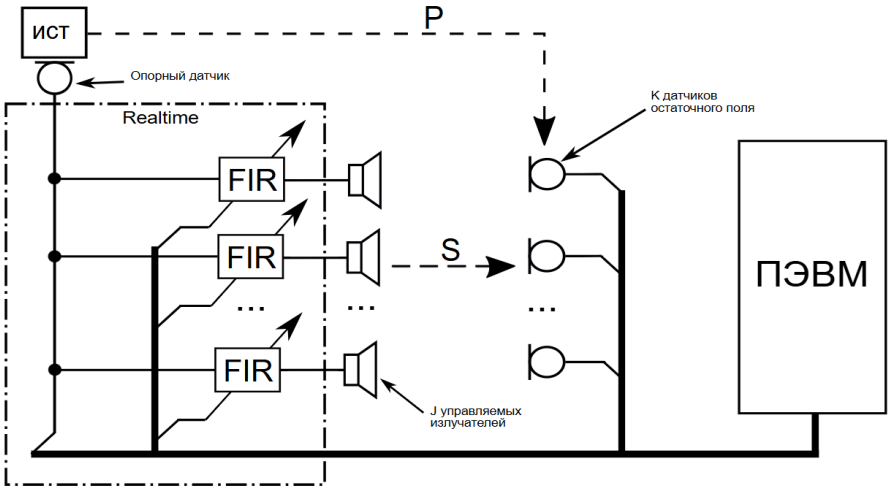


Рис. 1. Структурная схема системы активной виброизоляции

Рассмотрим работу системы в частотной области. Поле **e** на K датчиках остаточного поля выражается как

$$\mathbf{e} = \boldsymbol{y}_p + \boldsymbol{y}_s = \mathbf{Pv} + \mathbf{Sy} = \mathbf{Pv} + \mathbf{SWv} \tag{1}$$

где **v** – сигнал на опорном датчике, **P** и **S** – передаточные матрицы от источника вибраций и от J управляемых излучателей к датчикам остаточного поля соответственно, **W** – искомая матрица частотных характеристик формирующих фильтров. Минимизируется функционал, связанный с мощностью остаточного поля

$$\mathbf{F} = \mathbf{e}^H\mathbf{e} + \alpha\mathrm{tr}(\mathbf{W}\mathbf{W}^H) \tag{2}$$

где α – параметр регуляризации, Матрица комплексных коэффициентов передачи, минимизирующая функционал (2), определяется по формуле

$$\mathrm{vec}(\mathbf{W}) = (\alpha\mathbf{I} + \mathbf{B}^T \otimes \mathbf{A})^{-1}\mathrm{vec}(\mathbf{C}), \tag{3}$$

где $\mathbf{A} = 2\mathbf{S}^H\mathbf{S}$, $\mathbf{B} = \mathbf{v}\mathbf{v}^H$, $\mathbf{C} = -2\mathbf{S}^H\mathbf{y}_p\mathbf{v}^H$, а символ ⊗ обозначает произведение Кронекера [3].

Полученные таким образом комплексные частотные характеристики **W** преобразуются в импульсные характеристики (ИХ) формирующих фильтров поканальным обратным преобразованием Фурье

$$\mathbf{H} = FFT^{-1}(\mathbf{W}). \tag{4}$$

Для обеспечения физической реализуемости применяется итерационная процедура, состоящая из обнуления некаузальных частей ИХ и уточнения решения по остаточному полю с накоплением:

$$\begin{gathered}\mathbf{H}_0 = FFT^{-1}(\mathbf{W}),\\ \mathbf{H_0}(t<0)=0,\\ \mathbf{H} \leftarrow \mathbf{H} + \mathbf{H}_0.\end{gathered} \tag{5}$$

При этом адаптация выполняется поблочно на ЭВМ общего назначения, а вычисление свертки опорных сигналов **v** с актуальными ИХ **H** – осуществляется на ПЛИС в режиме реального времени, что позволяет совместить высокую скорость сходимости алгоритма с низкой задержкой обработки, необходимой для увеличения ширины частотной полосы эффективного подавления. Передаточные матрицы **S**, необходимые для вычисления ИХ формирующих фильтров, определяются на этапе калибровки системы. Подробнее алгоритм работы системы рассмотрен в [3-6].

2 Экспериментальная установка и результаты эксперимента

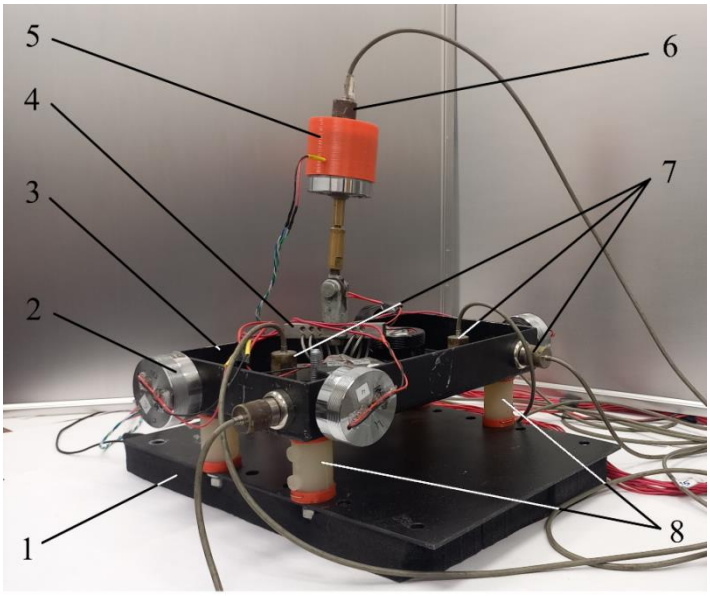


Рис. 2. Экспериментальная установка: 1 – виброизолированная платформа (фундамент); 2 – управляемый излучатель; 3 – вибрирующая платформа; 4 – тросовый амортизатор; 5 – источник компенсируемых вибраций; 6 – опорный датчик; 7 – датчики остаточного поля; 8 – амортизаторы силиконовые

Установка состоит из двух металлических платформ (поз. 1, 3 рис. 2), связанных амортизаторами (поз. 8). При помощи крепежных элементов производилась установка вибродатчиков (поз. 6, 7) и виброисточников (поз. 2, 5) в требуемые точки конструкции. Конструкцией предусмотрена возможность изменения количества используемых вибродатчиков и виброисточников и замены типов применяемых амортизаторов.

Датчики и виброисточники подключались к многоканальному блоку ввода и формирования сигналов (БВФС), построенного на базе ПЛИС и многоканальных аналогово-цифровых (АЦП) и цифро-аналоговых преобразователей (ЦАП). Управление работой БВФС

и взаимодействие с управляющей ПЭВМ по интерфейсу Ethernet обеспечивалось при помощи процессорного модуля. Обработка сигналов с датчиков и вычисление коэффициентов формирующих фильтров производилась на управляющей ПЭВМ. Усиление сигналов с выходов ЦАП БВФС производилось при помощи многоканального усилителя мощности класса D. ПЛИС осуществляла регистрацию сигналов с датчиков, передачу отсчетов сигналов в управляющую ПЭВМ посредством процессорного модуля, вычисление свертки опорного сигнала с импульсными характеристиками многоканального формирующего фильтра и передачу результатов свертки на ЦАП для формирования компенсирующего воздействия. В процессе разработки было уделено внимание вопросу уменьшения задержки на обработку сигналов в БВФС. Известно, что использование широко распространенных сигма-дельта АЦП и дельта-сигма ЦАП не позволяет снизить задержку на аналогово-цифровое и цифро-аналоговое преобразование ниже определенного количества тактов задающего генератора, определяющего частоту дискретизации в АЦП и ЦАП. Авторами был применен подход, заключающийся в искусственном повышении в несколько раз частоты дискретизации для снижения времени преобразования в АЦП и ЦАП и применением децимации входных и интерполяции выходных цифровых сигналов в БВФС. При использовании БИХ-фильтров для децимации и интерполяции неизбежно появление неравномерности ФЧХ тракта, однако, это учитывается в алгоритмах обработки и формирования сигналов на этапе калибровки системы.

Конструкция экспериментальной установки позволяла, как исследовать возможности виброизоляции верхней платформы от внешних вибрационных воздействий (кинематическое возбуждение) [4], так и возможности снижения воздействия виброактивного оборудования на основание. При кинематическом возбуждении источник вибраций размещался на нижней платформе, а для исследования виброизоляции фундамента источник размещался на верхней платформе.

Экспериментальные исследования с применением системы активного гашения вибраций приводились на шумовых сигналах с полосой 60...120 Гц. В ходе эксперимента возбуждалась верхняя платформа. В данной постановке эксперимента имитируется воздействие виброактивного оборудования, такого как, например, электропривод, дизель-генераторы, насосное оборудование и т.п. на фундамент.

Зависимости амплитуд сигналов на датчиках остаточных вибраций от времени в процессе настройки коэффициентов формирующих фильтров показаны на рис. 3 слева, спектральная плотность мощности (СПМ) на одном из датчиков остаточных вибраций до и после включения компенсации – на рис. 3 справа. Анализируя результаты, показанные на рис. 3, можно заметить, что уровень подавления во всей полосе частот достигает 14 дБ и до 20 дБ для отдельных частот.

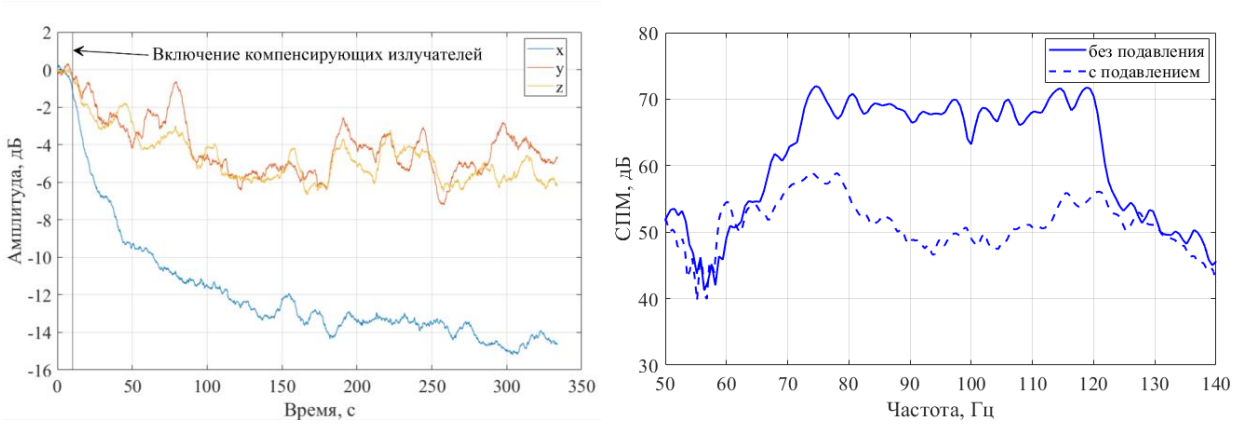


Рис.3. Результаты эксперимента: зависимость амплитуды сигналов на датчиках остаточных вибраций от времени (слева); СПМ сигнала на выходе одного из датчиков остаточного поля (справа)

Заключение

Использование систем активной виброизоляции помогает значительно снизить уровень структурных и ударных воздействий, передающихся на фундамент. Разработанная унифицированная программно-аппаратная система активного гашения демонстрирует высокую эффективность для решения широкого класса задач, в том числе для решения задачи изоляции виброактивного оборудования, что подтверждается проведенным экспериментальным исследованием.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Чащину А.С., Сокову А.М. и Емельянову М.Б. за разработку аппаратного и микропрограммного обеспечения БВФС.

Список литературы

1. *Denenberg J.N.* Anti-noise // IEEE Potentials, April 1992. **11**. № 2. P. 36–40.
2. *Kuo S.M., Yenduri R.K., Gupta A.* Frequency-domain delayless active sound quality control algorithm // J. Sound Vibration. 2008. **318**. № 4-5. P. 715–724.
3. *Львов А.В., Карасева В.А., Родионов А.А., Окунев А.Г.* Экспериментальное исследование широкополосного алгоритма активного гашения звука с быстрой адаптацией в частотной области // Акустический журнал, 2025, **71**, № 1, с. 138–145.
4. *Карасева В.А., Львов А.В., Окунев А.Г.* Экспериментальное исследование активного гашения вибраций // Труды XXIX научной конференции по радиофизике, посвящённой 80-летию радиофизического факультета, 2025, **1**, С. 316-319.
5. *Karaseva V.A., Lvov A.V., Rodionov A.A.* Frequency-Domain Wideband Acoustic Noise Cancellation System // Journal of Applied Mathematics and Physics, 2023. **11**, № 8, P. 2523–2532.
6. *Львов А.В., Родионов А.А., Кутузов Н.А., Карасева В.А.* Способ активного гашения вибраций – Патент РФ 2798744 – 26.06.2023.

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39713

Особенности вибрационных характеристик пригородных поездов при движении с высокой скоростью

Шубин И.Л.[1)], Цукерников И.Е.[1)], Невенчанная Т.О.[1)], Щурова Н.Е.[1)], Тихомиров Л.А.[1)]

[1)] НИИСФ РААСН, Москва;

Тел.: (495 4823712); E-mail: niisf@mail.ru

Существующие нормативные документы регулируют допустимые величины вибрации в помещениях жилых и общественных зданий, а введенный в 2019 г. свод правил СП 441.1325800. 2019 устанавливает метод прогнозирования вибрации от действующих и проектируемых линий на основе вибрационных характеристик поездов, однако приведенные в СП значения данных параметров определены по малой выборке результатов измерений и не могут в полной мере использоваться для прогнозирования уровней вибрации при проектировании.

В работе приведены результаты измерений вибрационных характеристик пригородных поездов в городе Москве. Измерения проводились при различных скоростях движения поездов, а после обработки результатов были подготовлены регрессионные уравнения и вычислены спектральные коэффициенты связи. На основе полученных результатов, имея данные о скорости поезда, можно получить значения корректированной виброскорости, и используя спектральные коэффициенты связи, рассчитать значения вибрационных характеристик в октавных полосах частот.

В работе показано, что имеется тенденция увеличения виброскорости с повышением скорости движения поезда. При этом при увеличении скорости свыше 70 км/ч наблюдается значительное увеличение данного параметра.

Ключевые слова: оценка, прогнозирование, вибрация, железнодороный транспорт, вибрационные характеристики, измерения

Peculiarities of vibration characteristics of suburban trains when traveling at high speed

Shubin I.L.[1)], Tsukernikov I.E.[1)], Nevenchannaya T.O.[1)], Shchurova N.E.[1)], Tikhomirov L.A.[1)]

[1)] NIISF RAACS, Moscow;

Tel.: +7(495 4823712); E-mail: niisf@mail.ru

Existing regulatory documents regulate the permissible vibration values in residential and public buildings, and the code of rules SP 441.1325800. 2019, introduced in 2019, establishes a method for predicting vibration from existing and designed lines based on the vibration characteristics of trains, however, the values of these parameters given in the code of rules are determined from a small sample of measurement results and cannot be fully used to predict vibration levels during design.

The paper presents the results of measurements of vibration characteristics of suburban trains in the city of Moscow. The measurements were carried out at different train speeds, and after processing the results, regression equations were prepared and spectral coupling coefficients were calculated. Based on the results obtained, having data on the speed of the train, it is possible to obtain the values of the corrected vibration velocity, and using spectral coupling coefficients, calculate the values of vibration characteristics in octave frequency bands.

The paper shows that there is a tendency for vibration velocity to increase with increasing train speed. At the same time, with an increase in speed above 70 km/ h, there is a significant increase in this parameter.

This feature should be taken into account when designing vibration protection near railway sections with high train speeds.

Keywords: assessment, forecasting, vibration, railway transport, vibration characteristics, measurements

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39714

Новые национальные стандарты по определению звукоизоляции строительных конструкций с помощью интенсиметрии

Цукерников И.Е. [1)], Шубин И.Л.[1)], Невенчанная Т.О.[1)], Щурова Н.Е.[1)], Тихомиров Л.А.[1)]

[1)] НИИСФ РААСН, Москва;

Тел.: +7(910 4855832); E-mail: 3342488@mail.ru

Рассматриваются основные положения новых национальных стандартов России ГОСТ Р 71833-2025 и ГОСТ Р 71834-2025, устанавливающих методы определения изоляции воздушного шума строительным изделием по измерениям интенсивности звука в лабораторных и натурных условиях. Стандарты являются модифицированным введением в Российской Федерации международных стандартов ИСО 15186-1:2000 и ИСО 15186-2:2003 соответственно.

Одной из важных особенностей применения стандартов является невозможность использования традиционных методов по ГОСТ 27296, ГОСТ Р ИСО 10140-1 и ГОСТ Р ИСО 10140-2 из-за наличия шума помехи в приемном помещении и высокой косвенной передачи звука в приемное помещение.

Рассмотрены особенности измерения интенсивности звука и применяемая аппаратура.

Даны правила выбора измерительной поверхности. Указаны существенные отличия российских стандартов от их международных аналогов.

Приведены результаты оценки влияния наличия звукопоглощения внутри измерительной поверхности, препятствующего выполнению основного свойства метода интенсиметрии – равенства нулю интеграла по измерительной поверхности, окружающей испытуемый объект, от нормальной составляющей интенсивности звука поля помехи, расположенной вне измерительной поверхности и приводящие к погрешности метода.

Рассмотрен способ учета этого влияния, позволяющий существенно снизить данную погрешность.

Ключевые слова: стандарт, строительное изделие, звукоизоляция, интенсиметрия, влияние звукопоглощения

New national standards for determining the sound insulation of building structures using intensimetry

Tsukernikov I.E.[1)], Shubin I.L.[1)], Nevenchannaya T.O.[1)], Shchurova N.E.[1)], Tikhomirov L.A.[1)]

[1)] NIISF RAACS, Moscow;

Tel.: +7(910 4855832); E-mail: 3342488@mail.ru

The main provisions of the new Russian national standards GOST R 71833-2025 and GOST R 71834-2025, which establish methods for determining the insulation of air noise from building products by measuring sound intensity in laboratory and field conditions, are considered. The standards are a modified introduction in the Russian Federation of the international standards ISO 15186-1:2000 and ISO 15186-2:2003, respectively.

One of the important features of the application of standards is the inability to use traditional methods according to GOST 27296, GOST R ISO 10140-1 and GOST R ISO 10140-2 due to the presence of noise interference in the receiving room and high indirect transmission of sound to the receiving room.

The features of sound intensity measurement and the equipment used are considered.

The rules for selecting the measuring surface are given. Significant differences between Russian standards and their international counterparts are indicated.

The results of the evaluation of the influence of the presence of sound absorption inside the measuring surface, which prevents the fulfillment of the basic property of the intensification method – the equality of the integral over the measuring surface surrounding the test object to zero from the normal component of the sound intensity of the interference field located outside the measuring surface and leading to an error in the method. A method of accounting for this effect is considered, which significantly reduces this error.

Keywords: standard, building product, sound insulation, intensification, sound absorption effect

УДК: 628.517.2 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39715

Анализ эффективности применения шумозащитных экранов, как одного из способов снижения шума в застройке Москвы

Н.К. Кирюшина[1,a], И.А. Гончаренко [2,b], А.И. Пузакова [3,c]

[1,2,3] ГАУ «Институт Генплана Москвы», 125047, Москва, 2-я Брестская ул., дом 2/14

E-mail: [a] kiryushinaNK@str.mos.ru, [b] goncharenkoIA1@str.mos.ru, [c] puzakovaAI@str.mos.ru

Аннотация: В статье приведены результаты оценки эффективности использования шумозащитных экранов, расположенных вдоль автомагистралей в Москве. Рассмотрены показатели, позволяющие оценить эффект от их использования в городе. Приведены результаты измерения снижения шума за счет экранирования в наиболее типичных условиях применения. Результаты получены на основе сравнения показателей измеренных уровней шума на транспортных автомагистралях, за экранами и на территориях с различными значениями допустимы уровней шума.

Ключевые слова: Шумовая характеристика транспортного потока, эквивалентный уровень звука, шумозащитный экран, автомагистраль, нормируемые объекты, эффект защиты территории и застройки, риски от влияния транспортного шума на здоровье человека.

Analysis of the effectiveness of noise protection barriers as one of the ways to reduce noise in residential build up areas in Moscow

N.K. Kiryushina[1,a] , I.A. Goncharenko[2,b], A.I. Puzakova [3,c],

[1,2,3] Genplan Institute of Moscow, Moscow 125047, Russia

E-mail: [a] kiryushinaNK@str.mos.ru, [b] goncharenkoIA1@str.mos.ru, [c] puzakovaAI@str.mos.ru

Annotation. This article presents the results of evaluating the effectiveness of noise protection barriers located along urban highways in Moscow. Indicators allowing estimation the effect of their use in the city have been considered. The results of measuring noise reduction due to shielding in the most typical application conditions are presented. The results were obtained on the base on a comparison of measured noise levels on highways and behind noise protection barriers, and in areas with different values of permissible noise level. obtained during field measurements has been performed.

Keywords: noise characteristics of the traffic flow, noise level, noise barrier, urban highway, objects with normalized sound levels, the acoustic effect of noise reduction, risk evaluation.

Введение

Строительство шумозащитных экранов вдоль транспортных магистралей, их параметры определяются необходимостью выполнения требований санитарных норм при размещении вдоль них территорий и объектов, для которых установлены ограничения к допустимым уровням шума. Акустическое состояние на территории и в помещениях жилых и общественных зданий, расположенных в городе Москве, главным образом, определяется шумом, создаваемым движением автомобильного транспорта. В современных городах, включая Москву, автомобильные магистрали, все чаще проходят в непосредственной близости от жилых домов, что вызвано увеличением плотности улично-дорожной сети, полос движения на дорогах и дефицитом городских территорий. Одним из способов снижения шума в городской застройке является использование экранирующих сооружений на пути распространения шума между магистралями и жилой застройкой. В соответствии с [1] экранами могут являться элементы рельефа, жилые и общественные здания, а также специальные сооружения в виде вертикальных или наклонных стенок различной конструкции, земляных насыпей, выемок, галерей и т.п., установленные вдоль автомобильных дорог – далее экраны. Использование тоннелей, протяженных выемок, галерей является наиболее эффективными средствами снижения шума в застройке. Эти объекты являются сложными техническими сооружениями, требующие значительных затрат на строительство и последующую эксплуатацию и не могут быть массовым средством для защиты от шума. Наибольшее распространение в городе получили экраны в виде стенок, устанавливаемые вдоль магистралей. В 2008 году было принято Постановление правительства РФ №87 утвердившее Состав разделов проектной документации и требования к их содержанию, который предусматривает при проектировании линейных объектов разработку мероприятий по обеспечению санитарно-эпидемиологического благополучия населения или снижение негативного влияния на окружающую среду, включая шумовое загрязнение. В составе смет на строительство предусмотриваются затраты на принимаемые мероприятия, что обеспечивает их реализацию при строительстве [2],

Выбор параметров, конструкций и материалов экранов происходит на стадии разработки проектной документации и обосновывается расчетом, выполняемым в соответствии с методиками, реализованными в лицензированных расчетных комплексах. Порядок расчета снижения шума экранами в зависимости от параметров застройки, ширины транспортных магистралей, размерных параметров экранов и их конструкции, установлен в [1].

Отношение специалистов, руководителей города и его жителей к установке шумозащитных экранов является неоднозначным. С одной стороны, у специалистов,

занимающихся обеспечением нормативного качества окружающей среды или не ухудшением акустической ситуации в результате появления нового источника шума и увеличения шума от уже существующего, не так много возможностей для его снижения. Особенно это утверждение справедливо для существующей жилой застройки и ее элементов, попадающих в зону акустического влияния магистралей. С другой стороны, затраты на строительство шумозащитных экранов, по данным специалистов института Генплана Москвы, составляют в среднем 26% от стоимости строительства 1 км автомагистрали, что приводит к повышению стоимости строительства дорог. При этом значительная часть жителей Москвы хотели бы, чтобы территории их домов были ограждены от внешнего негативного влияния транспортных потоков. Большинство таких просьб и пожеланий, направляемых в городские органы связаны с надеждами на снижение шума и в городских квартирах, что не происходит в многоэтажных домах при использовании экранов.

Имеются сведения о том, что шумозащитные экраны способствуют снижению загрязнения атмосферного воздуха отработавшими газами автомобилей до 70% [3], что также принимается во внимание при оценке снижения негативного влияния автотранспорта при строительстве автомагистралей. К настоящему времени накопились определенные противоречия, вызывающие необходимость реальной оценки применения придорожных экранов для оценки эффективности затрат на их строительство.

Методика оценки

Для оценки реальной акустической эффективности экранов, выстроенных в разные годы вдоль транспортных магистралей в Москве авторами статьи в составе работы, выполненной институтом Генплана Москвы по заданию Москомархитектуры (МКА) 2025 г, были выполнены натурные измерения уровней шума на улично-дорожной сети и за экранами. Было проведено сравнение измеренных уровней шума на территории защищенных экранами объектов, и в аналогичных точках, не экранируемых со стороны магистралей. В качестве объектов исследований были определены участки жилой и общественной застройки наиболее типичные для размещения экранов в городе Москве. Высота экранов от 3 до 6 м. Выбранные экраны располагались вдоль магистралей непрерывного и регулируемого движения с 5-10 полосами движения в двух направлениях. Рассматривались следующие приемы размещения, при которых: экраны выстроены вдоль проезжей части улицы и предназначены для снижения шума на территории малоэтажной, усадебной жилой застройки и территорий больниц; на эстакаде вдоль основного хода магистрали, при наличии бокового проезда вдоль жилых домов и детских площадок; при наличии на территории других не экранируемых автотранспортных источников.

Учитывая характер объектов, защищаемых от шума, измерения проводились на высоте 1,5 м от поверхности земли. Измерения выполнялись в соответствии с утвержденными методиками проведения измерений.

Данные о результатах измерений приведены в соответствующих протоколах измерений, хранящихся в архиве Испытательной лаборатории ГАУ «Институт Генплана Москвы». Показатели, полученные путем натурных измерений, сравнивались с расчетными уровнями снижения шума, приведенными в составе проектной документации на строительство экранов, которые были представлены Заказчиком (МКА) на выполнение работы в соответствии с Техническим заданием.

Помимо результатов оценки эффективности снижения шума придорожными экранами была выполнена оценка рисков от влияния транспортного шума на здоровье населения в условиях проживания на территории без снижения шума экранами и при строительстве шумозащитных экранов. Показатели рисков были определены в составе работы, выполненной соисполнителями работы ФБУН «ФНЦГ им. Ф.Ф. Эрисмана». Оценка рисков выполнена в соответствии с методикой [1]. Риски определялись для условий строительства магистралей без применения средств шумозащиты в виде экранов и с условием их применения.

Результаты оценки

При выполнении измерений эквивалентные корректированные по шкале А уровни шума проходящих по магистралям, вдоль которых выстроены исследуемые экраны, составили в дневное время от 70 до 78 дБ.

Для экранов высотой 6 м, установленных по краю проезжей части улиц или вдоль тротуара, проходящего вдоль проезжей части при числе полос движения от 5 до 10 на расстоянии от 20 до 40 м от экрана, снижение шума составило 10 - 14 дБ. В 2- х м от внутренней стороны экрана эффект снижения шума составляет 16-18 дБ. Снижение уровней на объектах, защищаемых от шума составило от 5 до 14 дБ.

Экраны высотой 3 м, установленные по линии застройки, снизили уровень шума в 2-х м от наружной стороны экрана, за которыми расположены детские площадки, на 8-9 дБ. Экраны высотой 4 – 4,5 м, установленные по краю проезжей части эстакады высотой 4 м, снизил уровень шума на защищаемых объектах, расположенных в 20-30 м за экраном, на 2-4 дБ. Низкие показатели снижения связаны с многократным отражением звука от экрана и стен домов, что приводит к не эффективному использованию экранов. Конструкция экранов не оказала влияния на величину снижения уровня шума, при том, что она соответствует требованиям, установленным к элементам экранов с позиции обеспечения минимальной поверхностной плотности. При шумовых характеристиках, зафиксированных на

исследуемых магистралях, экраны не позволили достичь обеспечение нормативных уровней шума на исследуемых территориях, исключая территории малоэтажной жилой застройки, расположенной на новых территориях города Москвы вдоль улиц районного значения.

Оценка рисков показала, что при строительстве экранов риск, вызываемый влиянием автотранспортного шума на здоровье населения, может оцениваться как «пренебрежительно малый», в то время как без экранов он может быть, как «умеренным» для различных групп населения, так и «очень высоким».

Наличие экранов позволило при строительстве новых автодорог и при реконструкции существующих с целью увеличения пропускной способности не ухудшить акустическое состояние на прилегающей территории или привести к снижению уровней шума на территории и в застройке до показателей характерных до начала строительства или реконструкции магистрали.

Визуальная оценка состояния экранов во время проведения измерений позволила установить, что со стороны защищаемой застройки экраны носят индустриальный вид, территории за экраном не привлекательны с позиции визуального восприятия. При этом, относительно низкий уровень шума за экранами позволяет организовывать на ней размещение объектов, для которых не установлены ограничения к допустимым уровням шума, но желательно создание комфортных акустических условий для пешеходных и велосипедных прогулок, занятий спортом. Необходимо предусматривать благоустройство этих территорий, включающее все типы озеленения, что позволит воспринимать экраны не только как придорожные сооружения целевого назначения, но и часть благоустроенной территории микрорайонов.

Заключение

Применение шумозащитных экранов как элементов обустройства транспортных магистралей наиболее эффективно для снижения уровней шума на участках малоэтажной застройки, существующей и проектируемой на новых территориях Москвы, на площадках отдыха, размещаемых в составе жилых территорий и общественных пространств.

Сравнение расчетных и измеренных уровней шума показало, что эффективность снижения шума, приводимая в составе проектной документации, выше, чем измеренная в реальных условиях, что свидетельствует о необходимости дальнейшего совершенствования практических методов расчета, принимая во внимания прежде всего вопросы отражения от существующих застройки, наличие других значимых источников шума на территории, наличия разрывов в экранах, обусловленных планировочным решением размещения экрана и конструктивным решением.

Так как шумозащитные экраны в настоящее время стали неотъемлемой частью городской среды, их эффективность должна оцениваться совокупностью факторов, на которые оказывает влияние наличие экрана на прилегающей территории: снижение загрязнения атмосферного воздуха, уровней шума, риска здоровья населения, возможность создания благоустроенных городских пространств.

Список литературы

1. СП 276.1325800.2016. Здания и территории. Правила проектирования защиты от шума транспортных потоков (с Изменением № 1, 2), утв. приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Рос. Федерации от 03.12.2016 № 893/пр. // ПСС «Техэксперт».
2. О составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию (с изменениями на 21 октября 2025 года) Постановление Правительства Рос. Федерации от 16.02.2008 №87 // ПСС «Техэксперт».
3. Рекомендации по учету требований по охране окружающей среды при проектировании автомобильных дорог и мостовых переходов / Министерство транспорта; Федеральный дорожный департамент. - М., 1995 год.
4. МР 2.1.10.0059-12. Оценка риска здоровью населения от воздействия транспортного шума. Методические рекомендации, утв. главным государственным санитарным врачом РФ от 23.03.2012 // ПСС «Техэксперт».

Bibliography

1. СП 276.1325800.2016. Buildings and territories. Protection design rules from traffic noise.
2. Resolution of the Government of the Russian Federation. Federation № 87 from 02.16.2008.
3. Recommendations on the consideration of environmental protection requirements in the design of highways and bridge crossings, Moscow, 1995.
4. МР 2.1.10.0059-12. Assessment of the public health risk from exposure to traffic noise. Methodological recommendations, approved by the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation from 23.03.2012.

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39716

Особенности применения звукоизолирующей облицовки газопровода

Ягло М.А.[1)], Пименов И.К.[2)], Петров М.И.[3)]

[1)] ООО «Тепло изоляционные материалы», Санкт-Петербург;
[2)] Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург;
[3)] Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», Санкт-Петербург.
Тел.: +7(911)918-9543; E-mail: (yaglo@tim-firm.ru)

Представленная научная статья рассматривает проблему повышенного шума в узлах учета газораспределительных станций (ГРС), характеризующихся высокими показателями шумообразования, и методы прогнозирования эффективности средств снижения. Расчетная модель, сформированная на основе ограниченного объема акустических измерений, показывала удовлетворительные результаты использования композитной тепло-звукоизоляционной конструкции «НАТРУБУ-Тепло». Однако проведенные натурные испытания продемонстрировали несоответствие расчетных и эмпирических данных.

Причина подобного рассогласования заключается в совокупности различных факторов: особенностях конструктивных материалов, геометрии элементов, условиях эксплуатации укрываемого оборудования, особенностях монтажа конструкции. Экспериментальные наблюдения подтвердили значимость учёта всех аспектов при прогнозировании эффективности шумозащитных мероприятий.

Предложены новые подходы к расчету звукоизоляции, предусматривающие использование характеристик композитных материалов и физических свойств цилиндрических оболочек.

Исследование показало важную роль учета особенностей монтажа конструкции в обеспечении прогнозируемого эффекта снижения шума, а также факторов, связанных с реализацией проектных решений и соблюдением требований безопасности при эксплуатации.

В заключении авторы делают вывод о необходимости продолжения научных изысканий в области разработки универсальных методик расчета звукоизоляции, соответствующих современным требованиям промышленной шумозащиты, и предлагают рекомендации по учету нюансов монтажа при проведении акустического моделирования и проектировании шумозащитных решений.

Ключевые слова: тепло-звукоизоляционная конструкция, газопровод, шум, звукоизоляция, композитная мембрана

УДК: 534.836.2 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39717

Введение

Автомобильный транспорт является источником шума высокой интенсивности [1]. На шум, создаваемый автомобилями, влияют такие факторы, как: тип и класс автомобиля, скорость и характер движения, тип и качество дорожного покрытия, движения, тип двигателя и трансмиссии, и т.п. [2].

Основными источниками шума автомобилей являются: двигатель, вентилятор системы охлаждения двигателя, трансмиссия и задний мост, трение шин при движении, корпус автомобиля, гидравлические системы, система выпуска выхлопных газов, аэродинамический шум при движении автомобиля и др. Вклад каждого из перечисленных источников зависит от автомобиля и режима движения [3].

ОАО КАМАЗ постоянно ведет разработки перспективных семейств автомобилей КАМАЗ. Увеличение мощности транспортного средства неразрывно связано с ухудшением экологических характеристик, в том числе шумовых [4]. Вопросы исследования шумообразования и ликвидация источников шума при создании новых автомобилей стоят в числе приоритетных задач [5]. Современный потребитель к продукции завода предъявляет более высокие требования, причем, не только к тяговым характеристикам, но и к экологическим показателям. Для разработки технических предложений, направленных на снижение шума узлов и механизмов автомобиля КАМАЗ необходимы исходные данные. К ним относятся такие важные характеристики шума, как частотный диапазон, максимальное звуковое давление, направленность излучения шума [6]. Такие данные можно получить путем проведения исследовательских работ, преимущественно экспериментальных.

В статье представлены результаты экспериментальных исследований акустического поля, формируемого узлами и механизмами автомобиля КАМАЗ. Исследования проводились с целью определения характеристик шума автомобиля, излучаемых его основными источниками. Объектом исследования являлся автомобиль-самосвал КАМАЗ 65205, произведенный на ОАО «КАМАЗ».

1 Проведение экспериментальных исследований

Для получения характеристик шума, излучаемого узлами и механизмами автомобиля КАМАЗ, использовался акустический многофункциональный измерительный комплекс «Экофизика». В качестве датчиков пульсаций давления воздуха использовались конденсаторные микрофоны типа МР 201. Измерение и обработка акустического сигнала, в том числе в режиме телеметрии, осуществляется с помощью программного обеспечения Signal+.

При обработке результатов измерений использовался метод нескольких прямых измерений, находилось среднее значение искомой величины с учетом погрешности.

1.1 Исследования акустического поля, создаваемого неподвижным автомобилем

На первом этапе экспериментальных исследований строилась диаграмма уровня звукового давления для неподвижного автомобиля.

Основными источниками шума на неподвижном автомобиле являются ДВС и его подсистемы, струя выхлопных газов. Для определения распределения звукового давления от этих источников в окружающей среде регистрировался акустический сигнал в определенных точках, выбранных возле машины.

При проведении экспериментов двигатель автомобиля работал в режиме холостого хода. Номинальная частота вращения вала двигателя варьировалась дискретно и соответствовала: 700, 1800 и 2500 об/мин. Диапазон измеряемых частот соответствовал от 25 до 40 кГц.

Акустические сигналы регистрировался при помощи микрофонов, установленных на специальных штативах. Запись осуществлялась одновременно по 7-ми каналам на два измерительных комплекса. Результатом их обработки явились спектры акустических сигналов. Аналогичные результаты получены для всех выбранных точек измерения акустического сигнала. На основании спектров сигнала разрабатывалась диаграмма уровня звукового давления в окружающей среде.

Диаграммы уровня звукового давления построены всех выбранных частот вращения вала двигателя. Для примера, на рис. 1 приведена диаграмма уровня звукового давления, построенная для двигателя, работающего на холостом ходу на частоте вращения вала двигателя 2500 об/мин.

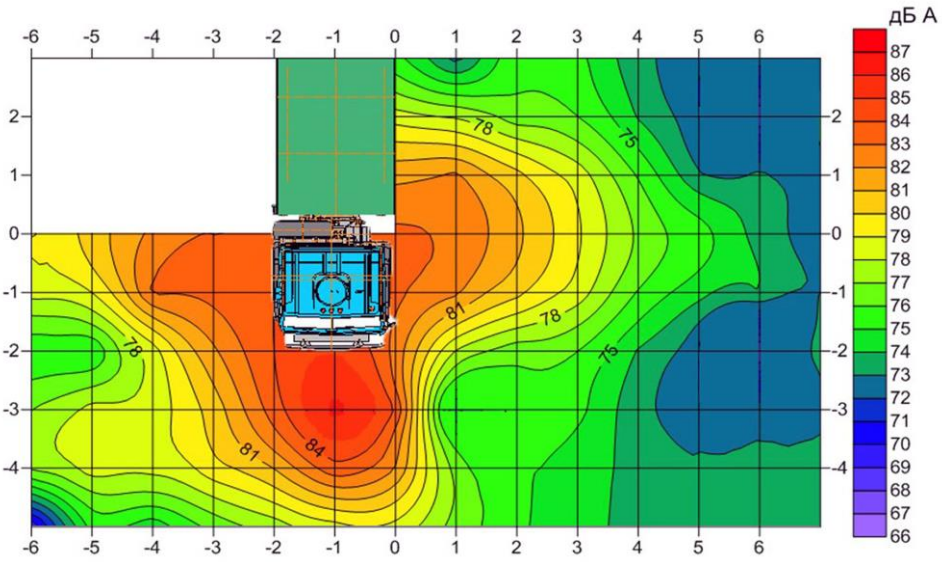


Рис. 1 - Диаграмма уровня звукового давления автомобиля КАМАЗ, работающего на холостом ходу с частотой вращения вала двигателя 2500 об/мин

1.2 Исследования параметров акустического поля, создаваемого узлами и механизмами движущегося автомобиля

При движении автомобиля, основными источниками шума автомобиля КАМАЗ являются: дизельный двигатель с системой турбонаддува, восьмиступенчатая коробка передач, ведущие мосты; система выпуска отработавших газов и трение шин о дорожное покрытие. С целью определения характеристик шумов от этих источников проводились исследования на движущемся автомобиле.

При помощи виброизолирующих креплений на автомобиле в зонах распространения шума устанавливались микрофоны, сигналы с которых регистрировались измерительным комплексом. Для примера, на рис. 2 показано крепление двух датчиков для регистрации акустических сигналов от двигателя автомобиля. Микрофоны в местах крепления располагались таким образом, чтобы влияние воздушного напора было минимальным.



Рис. 2 - Места расположения датчиков № 1 и № 2 в районе двигателя

Акустический сигнал с датчиков записывался на различных передачах переднего хода и скоростях движения автомобиля. Кроме этого, эксперименты проводились при движении автомобиля на различных дорожных покрытиях (грунтовое покрытие и асфальт).

2 Анализ экспериментальных данных

2.1 Первый этап испытаний

Первый этап испытаний был связан с определением параметров акустических полей, создаваемых автомобилем, стоящего неподвижно на грунтовой площадке. Серия экспериментов проводилась при одинаковых условиях. Переменным параметром была скорость вращения вала ДВС.

Из анализа спектров акустических сигналов, записанных датчиками расположенными перпендикулярно и параллельно оси машины определено, что в частотном спектре выделяются две «энергонесущие» частоты, которые имеют наибольшие значения амплитуд, причем значения этих частот между собой кратные. Эти частоты представляют собой первую и вторую гармоники акустического сигнала, генерируемого одним источником шума. Амплитуда колебаний на «энергонесущих» частотах, более чем на 10 дБ превышают остальные составляющие. По мере удаления места расположения датчиков от направления истечения струи амплитуда колебания на первой гармонике опять становилась доминирующей.

На основе этих данных можно сделать вывод, что акустическая энергия выхлопной струи в окружающем пространстве распространяется неравномерно. Как отмечалось выше, источником шума является газовая струя, истекающая из выхлопной трубы в пульсирующем режиме. Частота пульсаций струи соответствует частоте вращения вала двигателя с учетом числа цилиндров. По мере увеличения числа оборотов вала двигателя возрастает значение «энергонесущей» частоты в спектре акустического сигнала. Расчетное значение частоты пульсаций струи (по показанию тахометра) совпадает со значением «энергонесущей» частоты, полученным экспериментально путем измерения и анализа акустического сигнала. При увеличении скорости вращения вала двигателя частота с максимальными амплитудами смещается в более высокую область (соответствует частоте порционных газовых выбросов из цилиндров двигателя).

По мере удаления местоположения датчика от источника шума уровень звукового давления уменьшается. Как показали эксперименты, на частоте вращения вала ДВС равной 2500 об/м увеличение расстояния от источника шума до датчика на 2 м приводит к снижению уровня звукового давления на «энергонесущей» частоте с 93 до 88,5 дБ.

В ходе опытов также исследовались характеристики шумового поля в передней части кабины. Полученные здесь спектры показывают, что в передней части кабины частотный спектр шума имеет особенности. Частотный диапазон излучения шума расширяется до 500 Гц, а в зоне выхлопа газов из глушителя основной шум генерируется в частотном диапазоне от 20 до 300 Гц.

2.2 Второй этап испытаний

На втором этапе исследовались характеристики ближнего акустического поля, создаваемого узлами и механизмами автомобиля, движущегося по грунту. В ходе опытов переменными параметрами были отбор мощности при установке рычага скорости последовательно в положение 1, 2 и 3, и скорость движения автомобиля соответственно 9, 11 и 28 км/час.

На полученных спектрах имеются две сравнимых по амплитуде частоты колебаний системы. Значения амплитуд на этих частотах более чем на 10 дБ превышают остальные составляющие.

Эти «пики» представляют собой первую и вторую гармоники одного акустического сигнала, который генерируется выхлопной струёй газов. При смене положения номера передачи в большую сторону и увеличении скорости движения автомобиля наблюдается перераспределение акустической энергии между первой и второй гармоникой колебаний выхлопной струи, причём вторая гармоника на 8-10 дБ превышает уровень звукового давления первой гармоники.

На спектрах, полученных вблизи коробки передач в зависимости от номера передачи автомобиля, движущегося по грунту, можно увидеть качественную картину изменения характера шума. Замечено, что в момент разгона выхлопная струя автомобиля создает более интенсивный шум, чем механизмы коробки передач. Наибольший шум возникает на второй передаче. Это можно объяснить резонансными явлениями, протекающими в тракте движения выхлопных газов (частота выхлопа газов на 2-ой передаче близка к собственной частоте колебаний газового тракта).

Сравнительная картина характеристик спектров акустических сигналов, записанных в зоне расположения среднего моста при разгоне автомобиля, как по грунту, так и по асфальту, показывает, что поверхность дорожного покрытия начинает влиять на общий шум автомобиля при скоростях движения близких к 30 км/ч. При движении автомобиля по асфальту в спектре акустического сигнала появляются высокочастотные составляющие, амплитуды которых становятся близки низкочастотным составляющим. Частотный диапазон этих составляющих равен 400-600 Гц.

При анализе спектров сигналов, записанных в ближнем акустическом поле коробки передач автомобиля КАМАЗ при движении его по асфальту на различных передачах замечено, что в момент разгона доминирующим источником шума является выхлопная струя. При переключении коробки передач на высшие передачи (пятую и более) на спектрах шума появляются другие составляющие по амплитуде сопоставимые с ранее имеющимися. Это свидетельствует о том, что на высших передачах общий шум складывается из шумов, излучаемых различными источниками.

Заключение

На первом этапе испытаний определено, что основным источником шума неподвижного работающего автомобиля является шум турбулентной выхлопной струи и шум работы систем двигателя. Характер излучения шума выхлопной струи и систем работы двигателя отличаются друг от друга. Уровень шума турбулентной выхлопной струи двигателя в зоне ее истечения превышает уровни шума других источников на 10 дБ и более. В передней части кабины картина меняется. Основной вклад в шумообразование автомобиля вносят двигатель

и его системы. Уровень интегрального шума выхлопной струи на неподвижном автомобиле достигает 120 дБ и значительно превышает остальные источники шума.

На втором этапе испытаний основным источником шума, движущего по асфальтовой дороге автомобиля на скоростях до 30 км/ч, является шум турбулентной выхлопной струи. При увеличении скорости движения автомобиля наблюдается рост шума, создаваемого такими источниками как: коробка передач, мосты автомобиля, сцепление шин с дорожным покрытием, неровностями дороги. Кроме того, наблюдается увеличение аэродинамического шума, лежащего в диапазоне частот 5-10 Гц, однако его уровень меньше шума выхлопной струи на 20 дБ и более. На низких передачах КПП уровень шума турбулентной выхлопной струи ДВС превышает уровни шума других источников на 10 дБ и более, тем самым «маскируя» их влияние на общий уровень шума автомобиля в момент разгона. На высоких передачах КПП количество основных источников шума увеличивается. Они характеризуются следующими параметрами: значения амплитуд соответствуют 85-95 дБ, значения частот – 400-900 Гц.

После проведенных исследований, на основе экспериментальных данных были разработаны практические рекомендации по разработке мероприятий, направленных на снижение шума автомобильного транспорта.

Список литературы

1. *Индейкина О.С.* Изучение влияния транспортного шума на здоровье человека. // Стратегии развития современной науки. 2019. Ч. II. С. 7.
2. *Куракина Н.И., Мышко Р.А., Турыгина А.А.* ГИС оценки влияния дорожного транспорта на шумовое загрязнение городских территорий. // Известия СПбГЭТУ. 2023. **16**, № 4. С. 16.
3. *Буторина М.В., Тюрина Н.В., Иванов Н.И., Санников В.А.* Классификация автомобильных дорог по уровням шума. // Noise Theory and Pratice. 2021. **6**, № 4 (IV). С. 22.
4. *Швецов А.В., Дороничев А.В., Кузьмина Н.А.* Методы снижения шума автотранспорта. // J. Transport and Information Technologies. 2021. **11**, № 2. С. 115.
5. *Леванчук А.В., Курепин Д.Е.* Гигиеническая оценка шума автомобильного транспорта в зависимости от расстояния и высоты от источника шума. // Интернет-журн. «Науковедение». 2014. № 6 (25).
6. *Тюстина А.А.* Картографирование шумового загрязнения от автотранспорта: методы и приложения. // Актуальные исследования. 2025. № 16 (251). Ч. I. С. 69.

УДК: 629.017:629.018 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39718

Снижение шума силового агрегата на основе расчетных исследований

Р. И. Рахматов[1,a], Надарейшвили Г.Г. [1], Е. Ф. Тяка [1], Рахматов И.Р. [2]

[1)] Московский Политех, Москва, ул. Большая Семеновская 38;

[2)]ГБОУ Школа № 2098 имени Героя Советского Союза Л.М., Москва, Россия

E–mail: [a]rakhmatov.rakhmatdzhon@gmail.com

Аннотация: В работе представлена двухэтапная расчетная методика снижения структурного шума силового агрегата (бензинового двигателя внутреннего сгорания – ДВС) без изготовления физического прототипа. На первом этапе разработан аналитический инструмент на базе электронных таблиц (MS Excel) для расчета спектров возмущающих нагрузок по методу Гриневецкого–Мазинга, исключающий необходимость 1D-моделирования рабочего процесса. Полученные нагрузки использованы в качестве граничных условий конечно-элементного расчета виброакустического отклика силового агрегата, на основе анализа эквивалентной излучаемой мощности идентифицирована клапанная крышка как доминирующий источник структурного шума. На втором этапе проведена топографическая оптимизация крышки путем введения системы выштамповок. Сравнительный анализ функций передачи вибрации подтвердил снижение амплитуд виброскорости до 2.3 раза.

Ключевые слова: структурный шум, двигатель, имитационное и конечно–элементное моделирование, наружные поверхности, виброакустика.

NOISE REDUCTION OF A POWERTRAIN USING COMPUTATIONAL METHODS

R.I. Rakhmatov [1,a], Nadareishvili G.G.[1], E.F. Teaca[1], Rakhmatov I.R.[2]

[1)] Moscow Polytechnic University, 107023, Moscow, Bolshaya Semyonovskaya str., 38.

[2)] School No. 2098 named after Hero of the Soviet Union L.M. Dovator, Moscow, Russia

E–mail: [a]rakhmatov.rakhmatdzhon@gmail.com

Abstract: In this paper, a two-stage computational methodology for reducing structure-borne noise of a gasoline internal combustion engine (ICE) powertrain is presented, implemented without manufacturing a physical prototype. In the first stage, an analytical tool based on spreadsheets (MS

Excel) was developed for calculating excitation force spectra using the Grinewetzky–Mazing method, eliminating the need for 1D thermodynamic process simulation. The obtained loads were applied as boundary conditions for finite element analysis of the vibroacoustic response of the powertrain, and based on equivalent radiated power (ERP) analysis the valve cover was identified as the dominant source of structure-borne noise. In the second stage, topographic optimization of the valve cover was performed by introducing a system of embossments. Comparative analysis of vibration transfer functions confirmed a reduction in vibration velocity amplitudes by up to a factor of 2.3.

Keywords: structure–borne noise, engine, simulation and finite element modeling, external surfaces, vibroacoustic.

Введение

Снижение структурного шума двигателей внутреннего сгорания (ДВС) – приоритетная задача транспортного машиностроения. Уровень шума ДВС нормируется ГОСТ Р 53838–2010 [1] в рамках технического регламента Таможенного союза ТР ТС 018/2011 [2]. Традиционное обеспечение нормативных требований на стадии испытаний физических прототипов экономически неэффективно, а конструктивные изменения на поздних стадиях жёстко ограничены принятыми компоновочными решениями [3]. Это делает актуальной задачу прогнозирования и оптимизации акустического излучения ДВС на ранних этапах проектирования.

В работе реализована двухэтапная расчётная методика, позволяющая решить задачу без изготовления физического прототипа. Первый этап – прогнозирование шума: разработан аналитический инструмент на базе электронных таблиц (MS Excel), реализующий расчёт спектров возмущающих нагрузок (давления газов, сил инерции кривошипно-шатунного механизма, нормальных и тангенциальных сил) на заданных скоростных и нагрузочных режимах без применения специализированного ПО для 1D-моделирования рабочего процесса. Полученные нагрузки прикладываются к конечно-элементной модели силового агрегата, после чего по распределению эквивалентной излучаемой мощности (ERP) [4] идентифицируются доминирующие излучающие поверхности. Второй этап – топографическая оптимизация идентифицированных поверхностей путём введения выштамповок для повышения структурной жёсткости и снижения виброскорости; эффективность решений верифицируется повторным МКЭ-расчётом вынужденных форм колебаний и функций передачи вибрации (ФПВ).

1 Аналитическое прогнозирование возмущающих нагрузок бензинового ДВС

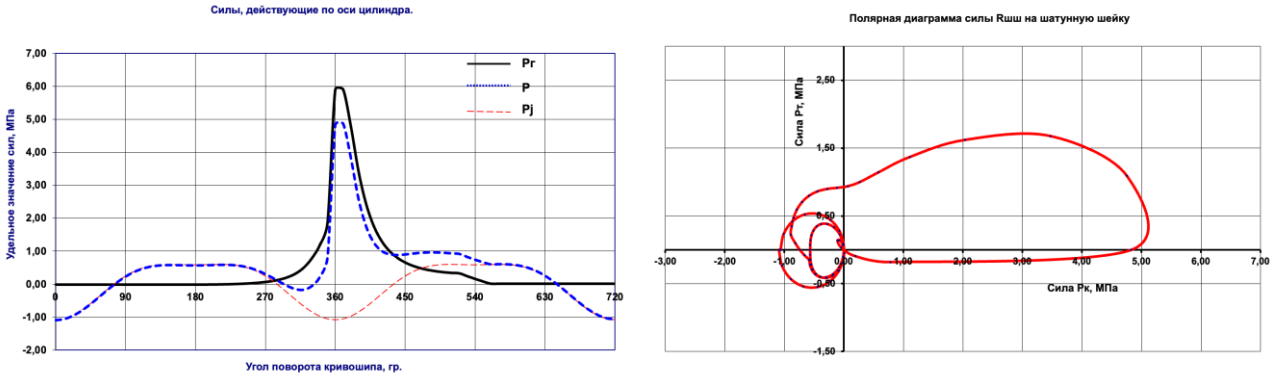
Первый этап направлен на получение спектров возмущающих нагрузок для конечно-элементного расчёта виброакустического отклика силового агрегата.

Объектом исследования является рядный четырёхцилиндровый бензиновый двигатель с порядком работы цилиндров 1–3–4–2 (n = 4000 об/мин, диаметр поршня D = 82 мм, ход S = 71 мм, ε = 9,8; λ = 0,296; показатели политроп сжатия/расширения 1,375/1,243; давление впуска 0,083 МПа, остаточных газов 0,110 МПа, максимальное давление сгорания 6,0 МПа; удельные массы поршня и шатуна 100 и 120 кг/м²; рабочий объём 1,50 л).

Расчёт реализован по методу Гриневецкого–Мазинга с шагом 10° угла поворота коленчатого вала на полном рабочем цикле 0–720°. На каждом шаге определяются: давление газов на поршень Pг (по политропным зависимостям с давлением сгорания до 6,0 МПа), сила инерции возвратно-поступательных масс Pj (с учётом первой и второй гармоник по параметру λ) и результирующая сила по оси цилиндра P = Pг + Pj в диапазоне от −1,09 МПа до +4,87 МПа; нормальная сила Pn и тангенциальная T на стенке цилиндра определяются из силовых соотношений КШМ.

Интегральные характеристики двигателя: pi = 1,024 МПа, Mi = 122,24 Н·м, Ni = 51,2 кВт, центробежная сила инерции вращающихся масс шатуна Kгш = 2,96 кН, среднее значение силы на шатунной шейке Rшш = 6,28 кН; максимальное Rшш достигает 22,86 кН в момент сгорания.

Результаты приведены на рис. 1. Полученные спектры сил по оси цилиндра, нормальных сил на стенку цилиндра и нагрузок на ГБЦ передаются в качестве граничных условий в КЭМ силового агрегата для расчёта виброакустического отклика.



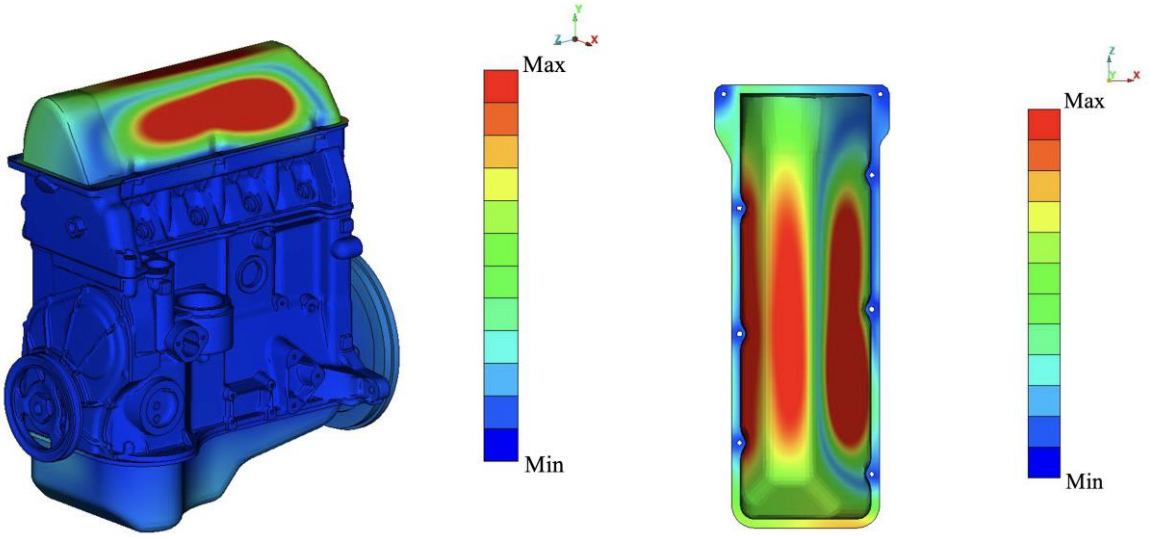
а *б*

Рис. 1. Результаты динамического расчета бензинового ДВС: *а* – изменение давления газов *P*г, суммарной силы *P* и силы инерции *P*j по оси цилиндра в зависимости от угла поворота коленчатого вала, *б* – полярная диаграмма нагрузок на шатунную шейку коленчатого вала.

2 Анализ акустического излучения и выявление «громких» поверхностей

Конечно-элементная модель (КЭМ) силового агрегата (1 817 411 объёмных элементов HEXA, 23 635 оболочечных CQUAD4/CTRIA3, 45 балочных CBEAM для болтов, 139 жёстких RBE3 для передачи нагрузок; размер элементов 4–6 мм) построена согласно рекомендациям [5] и реализована в HEXAGON MSC Nastran. Рассчитанные аналитически на первом этапе нагрузки прикладывались к соответствующим узлам КЭМ. Виброскорость наружных поверхностей

оценивалась методом эквивалентной излучаемой мощности (ERP). Результаты приведены на рис. 2.

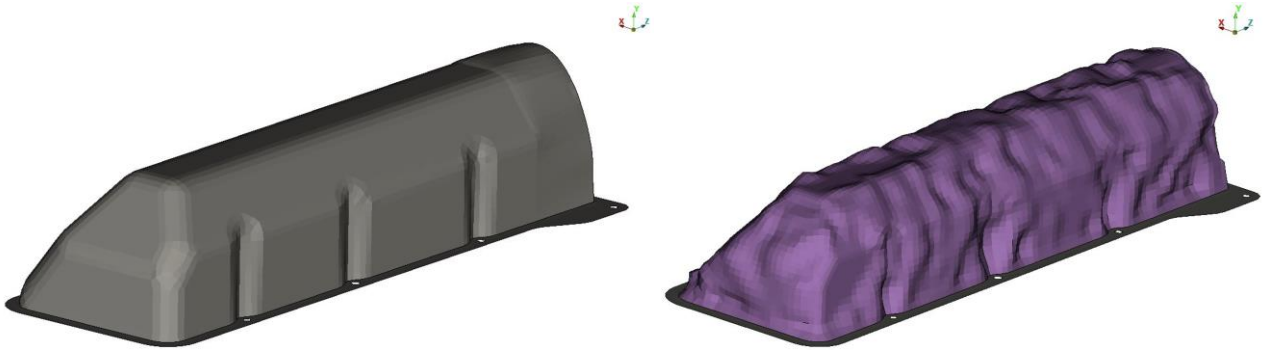


а *б*

Рис. 2. Распределение виброскорости по наружным поверхностям бензинового ДВС: *а* – общий вид силового агрегата; *б* – клапанная крышка двигателя. Виброскорость, мм/с.

Анализ распределения виброскорости по поверхности силового агрегата (рис. 2, *а*) показывает, что блок цилиндров, картер и навесные оборудование характеризуются низким уровнем виброскорости (синяя зона), что свидетельствует об их незначительном вкладе в акустическое излучение. Единственной зоной с критически высоким уровнем ERP (красная зона) является клапанная крышка двигателя, расположенная в верхней части силового агрегата. Данный компонент идентифицирован как доминирующий источник структурного шума и выбран объектом топографической оптимизации.

3 Топографическая оптимизация клапанной крышки и сравнительный анализ



а *б*

Рис. 3. КЭМ клапанной крышки: *а* – исходная конструкция; *б* – оптимизированная конструкция.

Детальный анализ распределения виброскорости по поверхности клапанной крышки (рис. 2, б) выявляет две симметричные зоны интенсивного излучения в центральной части,

соответствующие доминирующим формам собственных колебаний. Задача оптимизации сводится к подавлению этих форм путём изменения геометрической жёсткости поверхности; целевая функция – минимизация виброскорости в диапазоне 5–10 000 Гц. Исходная и оптимизированная конструкции приведены на рис. 3.

Валидация выполнена повторным конечно-элементным расчётом вынужденных форм колебаний и функций передачи вибрации (ФПВ). Сравнительный анализ распределения виброскорости для исходной и оптимизированной конструкций приведён на рис. 4.

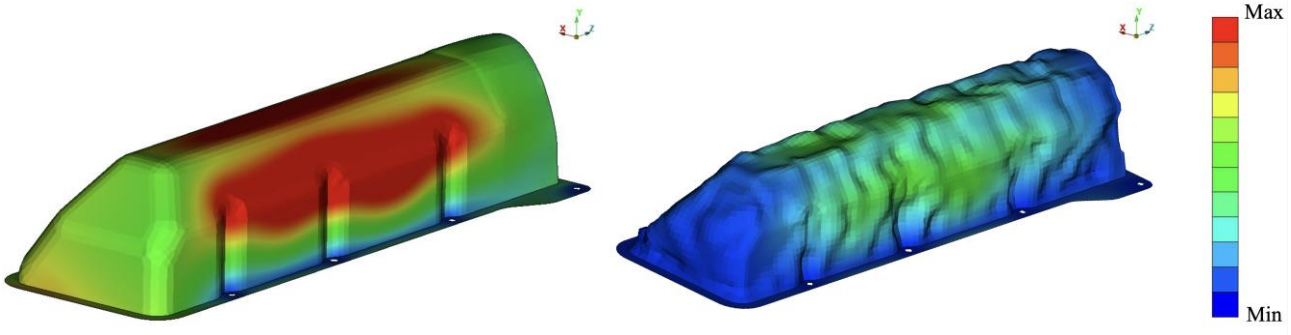


Рис. 4. Распределение виброскорости по поверхности клапанной крышки: *а* – исходная конструкция; *б* – оптимизированная конструкция.

Для исходной конструкции (рис. 4, а) характерна единая доминирующая форма вынужденных колебаний с максимальной амплитудой, локализованной в центральной части верхней плоскости крышки между рёбрами крепления свечей зажигания; виброскорость периферийных зон – 2,0–3,0 мм/с.

Оптимизированная конструкция (рис. 4, б) демонстрирует принципиально иной характер распределения: введение выштамповок повышает структурный механический импеданс крышки, подавляя глобальную доминирующую форму и трансформируя её в совокупность локальных форм с существенно меньшими амплитудами. Зоны с максимальным уровнем виброскорости отсутствуют; выштамповки разбивают поверхность на ячейки меньшего размера, повышая частоты их собственных колебаний и снижая отклик на рабочие частоты возбуждения ДВС.

Снижение максимальной амплитуды виброскорости соответствует уменьшению акустической мощности излучения по методике ERP не менее чем в 4 раза по максимальному пику.

4.2 Сравнительный анализ частотных характеристик (FRF)

Для количественной оценки эффективности оптимизации выполнен расчёт функций передачи вибрации (ФПВ) исходной и оптимизированной конструкций в частотном диапазоне 0–10 000 Гц. Результаты приведены на рис. 5.

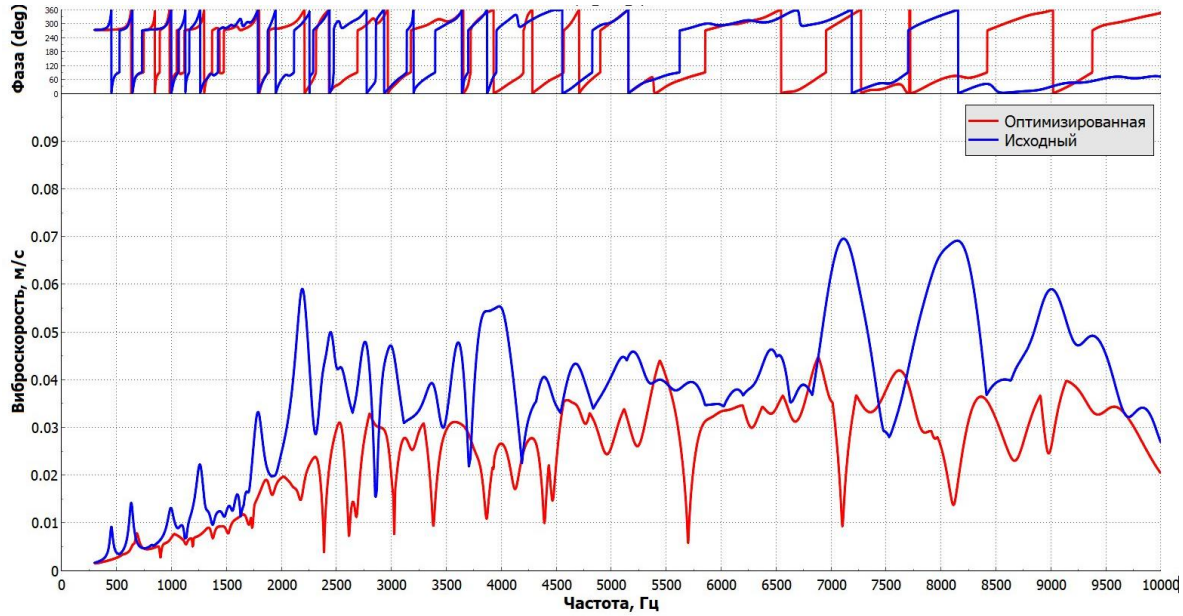


Рис. 5. Функции передачи вибрации клапанной крышки: амплитудно-частотная характеристика (нижняя часть) и фазово-частотная характеристика (верхняя часть) исходной и оптимизированной конструкций.

Исходная конструкция (синяя кривая) характеризуется рядом выраженных резонансных пиков: 2200 Гц (0,059 м/с), 3900 Гц (0,055 м/с), 7100 Гц (0,069 м/с) и 8100 Гц (0,068 м/с), соответствующих доминирующим формам собственных колебаний в рабочем диапазоне частот ДВС.

Оптимизированная конструкция (красная кривая) в диапазоне 500–1500 Гц демонстрирует снижение виброскорости в 1,5–2,0 раза за счёт повышения общей изгибной жёсткости крышки. В наиболее критичном диапазоне 1500–5000 Гц пик на 2200 Гц подавлен с 0,059 до 0,033 м/с (в 1,8 раза), пик на 3900 Гц – с 0,055 до 0,024 м/с (в 2,3 раза). В диапазоне 5000–10 000 Гц пики на 7100 и 8100 Гц снижены с 0,069 и 0,068 м/с до 0,041 и 0,038 м/с (в 1,7–1,8 раза). Фазовые скачки оптимизированной конструкции смещены в высокочастотную область, что свидетельствует об общем повышении частот собственных колебаний крышки.

Заключение

В работе предложена двухэтапная расчётная методика прогнозирования и снижения структурного шума бензинового ДВС, реализуемая без изготовления физического прототипа.

На первом этапе разработан аналитический инструмент на базе MS Excel, реализующий расчёт спектров возмущающих нагрузок по методу Гриневецкого–Мазинга и исключающий необходимость применения специализированного ПО для 1D-моделирования рабочего процесса. На основе анализа распределения ERP по наружным поверхностям двигателя идентифицирована клапанная крышка как доминирующий источник структурного шума.

На втором этапе проведена топографическая оптимизация клапанной крышки с введением системы выштамповок. Сравнительный анализ ФПВ подтвердил снижение амплитуд

виброскорости в 1,7–2,3 раза в рабочем диапазоне частот ДВС 500–10 000 Гц и уменьшение излучаемой акустической мощности в 5,3 раза. Предложенная методика применима на этапе концептуального проектирования двигателя, что позволяет существенно сократить число итераций виброакустической доводки и снизить затраты по сравнению с традиционным подходом на основе испытаний физических прототипов.

Список литературы

1. ГОСТ Р 53838–2010. Двигатели автомобильные. Допустимые уровни шума и методы измерения. – М.: Стандартинформ, 2010. – 19 с.

2. Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 018/2011 «О безопасности колесных транспортных средств». – Евразийская экономическая комиссия, 2011.

3. Priebsch H.–H., Krasser J. CAE process to simulate and optimise engine noise and vibration // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2005. – Vol. 19, No. 5. – P. 1003–1017. – DOI: 10.1016/j.ymssp.2004.09.005.

4. Klaerner M. et al. Estimation of radiated sound power: a case study on common approximation methods // Acta Acustica united with Acustica. – 2019. – Vol. 105, No. 6. – P. 1133–1150. – DOI: 10.3813/AAA.919388.

5. Rakhmatov R.I., Nadareishvili G.G., Galevko V.V. Improvement of vibroacoustic characteristics of transportation-technological vehicles by means of complex researches of powertrain vibrations at structural and air transmissions // NOISE Theory and Practice. – 2024. – Vol. 10, No. 2. – P. 7–34.

УДК: 534.2:656.1 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39719

Результаты моделирования акустической волны при оценке транспортного шума

М.Г. Бояршинов, А.М. Щелудяков

ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»
город Пермь
Тел.: 8 (342) 2198492; E-mail: sam@pstu.ru

Аннотация. Положительная динамика роста продаж автомобильного транспорта в России приводит к увеличению объема транспортной работы, выполняемой различными типами подвижного состава, что в свою очередь ведет к повышению интенсивности дорожного движения, однако интенсивность дорожного движения характеризуется неравномерностью с высокой загруженностью в мегаполисах и малой на автомобильных дорогах местного значения. Высокая интенсивность дорожного движения приводит к повышению шумового загрязнения транспортными потоками близлежащих территорий, а эксплуатация двухколесного транспорта на дорогах местного значения в летний период времени может содержать в себе пиковые акустические нагрузки, связанные с работой систем выпуска отработавших газов таких транспортных средств. Соответственно, в обоих вышеперечисленных случаях, шумовое загрязнение от транспортных потоков растет независимо от типа автомобильных дорог, условий движения и прочих факторов, поэтому обеспечение экологической безопасности автотранспортного комплекса на основе контроля уровня шумового загрязнения транспортных потоков является актуальной задачей. Кроме того, прогнозирование изменения и количественная оценка такого воздействия на всех участников дорожного движения и жителей является важным элементом моделирования транспортного шума. Исследования распространения акустической волны от автомобилей в составе транспортных потоков верифицируют результаты полученного моделирования и подтверждают достоверность полученных результатов. Основным элементом моделирования является составление зависимостей акустических колебаний от ряда факторов, влияющих на амплитуду, частоту и фазу.

Для описания акустических колебаний принимается, что изменения скорости, плотности и давления при распространении звуковой волны малы, её распространение предполагается адиабатическим, что позволило получить решение для акустического давления в произвольной точке с координатами $\{x, y, z\}$ от точечного источника звука, моделируемого с использованием δ-функции, движущегося с постоянной скоростью $\{V_x, V_y, 0\}$ и находящегося в точке с координатами $\{x_i, y_i, z_i\}$, в виде [1]

$$p_a(x,y,z,y_i) = -\frac{a_\vartheta \rho_0 \nu}{2c_S^2 R}\left[\sin(2\pi\nu u + \varphi) + \frac{c_S\sqrt{1-\beta^2}}{2\pi\nu R}\cos(2\pi\nu u + \varphi)\right] \times$$

$$\times\left\{1 - \frac{\beta_x v_x + \beta_y(v_y - V_y)}{c_S\beta^2\sqrt{(1-\beta^2)}(1-\beta^2)R}\left(\beta_x(x-x_i) + \beta_y(y-y_i) - \beta^2\sqrt{1-\beta^2}R^+\right) -\right.$$

$$\left. - \frac{\beta_x(v_y - V_y) - \beta_y v_x}{c_S\beta^2\sqrt{(1-\beta^2)}R}\left[\beta_x(y-y_i) - \beta_y(x-x_i)\right]\right\},$$

где

$$R = \sqrt{\frac{1}{\beta^2(1-\beta^2)}\left[\beta_x x + \beta_y(y - V_y t)\right]^2 + \frac{1-\beta^2}{\beta^2(1-\beta^2)}\left[\beta_x(y - V_y t) - \beta_y x\right]^2 + (z - z_S)^2},$$

$$u = t - \frac{1}{c_S(1-\beta^2)}\left[\sqrt{1-\beta^2}R - \beta_x(x - V_x t) - \beta_y(y - V_y t)\right],$$

$$\beta_x = \frac{v_x - V_x}{c_S}, \qquad \beta_y = \frac{v_y - V_y}{c_S}, \qquad \beta = \sqrt{\beta_x^2 + \beta_y^2},$$

t – время, a_ϑ, ν, φ – амплитуда, частота колебаний и сдвиг фазы колебаний источника акустической волны; ρ_0 – плотность воздуха, c_S – скорость звука в воздухе; v_x, v_y, v_z – компоненты вектора скорости воздушного потока в рассматриваемой области.

Построенное решение для акустического давления использовано для моделирования транспортного шума от случайного потока автомобильного транспорта [2]. В качестве основных допущений принято, что случайное событие появления k автомобилей на входном рубеже трассы в течение времени τ при среднесуточной интенсивности движения λ происходит с вероятностью P, описываемой закономерностями процессов пуассоновского типа [3, 4]. Это позволило получить для M однотипных потоков автомобилей математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение,

$$\langle P_a \rangle = \sum_{k=1}^{M}\frac{\lambda_k}{V_{yk}}\int_0^L p_{ak}(x,y,z,y_i)dy_i\,, \qquad D_L(P_a) = \frac{\lambda}{V_y}\int_0^L p_a^2(x,y,z,y_i)dy_i$$

и среднестатистического эквивалентного уровня звука

$$L_{Aeq} = 10\lg\left[\frac{L}{p_0^2}\sum_{k=1}^{M}\frac{\lambda_k}{V_{yk}}D_T(p_{ak})\right], \qquad D_T(p_{ak}) = \frac{1}{T}\int_0^T p_{ak}^2\big(x,y,z,y_i(t)\big)\,dt,$$

в произвольной точке $\{x,y,z\}$; где $p_{ak}(x,y,z,y_i)$ – поле акустического давления от подвижного источника, относящегося к транспортному потоку k-го типа, находящегося в точке с координатой y_i, имеющего скорость движения V_{yk} и интенсивность λ_k появления на въездном рубеже.

Ключевые слова: транспорт, акустическая волна, шум, моделирование, оценка

Список литературы

1. *Бояршинов М.Г.* Прикладная математика и транспортные задачи // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2026. № 1. С. 11–44. DOI: 10.25198/2077-7175-2026-1-11.
2. *Бояршинов М.Г.* Распределение концентрации выхлопных газов вблизи автотрассы со случайным потоком транспорта // Инженерно-физический журнал. 2006. Т. 79. № 6. С. 128-140.
3. *Вентцель Е.С., Овчаров Л.А.* Теория вероятностей и ее инженерные приложения. М.: Наука, 1988. 480 с.
4. *Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В.* Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений. М: Наука, 1965. 512 с.

The results of acoustic wave modeling in the assessment of traffic noise

M.G. Boyarshinov[a], A.M. Shcheludyakov[b]

Perm National Research Polytechnic University,

Perm, Komsomolsky avenue, 29.

E-mail: [a]mgboyarshinov@pstu.ru, [b] sam@pstu.ru

Abstract: The positive growth dynamics of motor vehicle sales in Russia leads to an increase in the volume of transport work performed by various types of rolling stock, which, in turn, results in higher traffic intensity. However, traffic intensity is characterized by uneven distribution, with high congestion levels in metropolitan areas and low traffic volumes on local roads. High traffic intensity contributes to increased noise pollution from traffic flows in adjacent territories. Furthermore, the operation of two-wheeled vehicles on local roads during the summer period may involve peak acoustic loads associated with the operation of exhaust gas systems of such vehicles. Consequently, in both of the aforementioned cases, noise pollution from traffic flows increases regardless of the type of road, traffic conditions, or other factors. Therefore, ensuring the environmental safety of the motor transport complex based on monitoring the noise pollution level of traffic flows is a relevant task. Moreover, predicting changes and quantitatively assessing such impact on all road users and residents is an important element of traffic noise modeling. Studies on the propagation of acoustic waves from vehicles within traffic flows verify the results of the performed modeling and confirm the reliability of the obtained results. The main element of modeling is the formulation of dependencies of acoustic oscillations on a range of factors affecting amplitude, frequency, and phase.

Keywords: motor transport, acoustic wave, traffic noise, noise simulation pollution, quantitative assessment.

PACS: 43.20.Bi Mathematical theory of wave propagation

УДК 534.26 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39720

Особенности поглощения звука резонатором Гельмгольца

Комкин А.И.[1)], Миронов М.А.[1,2)], Быков А.И.[1)]
[1)] МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва;
[2)]АКИН, Москва;
Тел.: 8-499-263-68-93; E-mail: akomkin@mail.ru

Аннотация: Рассмотрена линейная математическая модель резонатора Гельмгольца на торцевой стенке канала. Проведен анализ механизмов потерь звуковой энергии в резонаторе, которые связаны с вязкими потерями в горле резонатора и его кромках, а таже тепловыми потерями на стенках полости резонатора. Получены зависимости коэффициента поглощения резонатора от его геометрической конфигурации как экспериментальным, так и расчетным путем. На основе проведенных экспериментальных исследований проведена верификация математической модели резонатора, обеспечивающая соответствие экспериментальных и расчетных данных. Оценен вклад различных механизмов поглощения в резонаторе на его коэффициент поглощения.

Ключевые слова: импеданс, коэффициент поглощения, потери, расчет, измерения
PACS: 43.58.Kr

Введение

Оценка поглощения звука резонатором Гельмгольца является важной и актуальной для практики задачей. В настоящее время появляется все больше работ, в которых на основе конечно-элементного исследуются акустические метаматериалы, составной частью которых являются резонаторов Гельмгольца, с целью нахождения структур метаматериалов, обладающих повышенными поглощающими свойствами.

Поглощение звука в резонаторе Гельмгольца обусловлено, с одной стороны, вязкими потерями в окрестностях горла резонатора, а, с другой стороны, тепловыми потерями на стенках полости резонатора [1], которые при небольшом объеме полости резонаторы могут иметь существенное значение. Что касается вязких потерь, то их, следуя Ингарду [1], можно представить, как сумму двух составляющих: потерями в вязком погранслое на передней стенке резонатора с расположенным на ней горлом, и потерями на кромках горла. Величина первой составляющей зависит от отношения диаметра горла резонатора к диаметру его полости [1, 2]. Потери на кромках горла, то оценить теоретически очень сложно [3].

Обстоятельное исследование характеристик поглощения резонатора Гельмгольца с варьированием его геометрических параметров проведено авторами данной работы в [4], где исследовался торцевой резонатор Гельмгольца, как теоретически, так и экспериментально. При этом оказалось, что результаты расчеты не всегда соответствовали результатам измерений. Анализ полученных при этом результатов показал некорректность рассмотренной расчетной

модели и необходимость ее уточнения путем изменения подхода к учету вязких потерь на кромках горла резонатора. Данная работа посвящена уточнению математической модели, описывающей поглощение звука резонатором Гельмгольца и проверке ее адекватности.

Теория

Рассмотрим модель резонатора Гельмгольца (рис. 1*а*) в виде полости объемом V, которая сообщается с внешней средой посредством горла длиной l с площадью поперечного сечения S_0. При этом предполагается, что длины звуковых волн в рассматриваемом частотном диапазоне много больше характерных геометрических размеров резонатора.

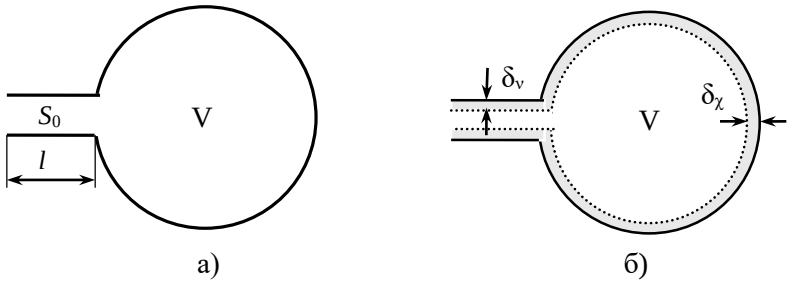


Рис. 1. Модели резонатора Гельмгольца без учета (а) и с учетом (б) наличия термовязкого погранслоя.

Эта модель резонатора Гельмгольца является аналогом простой механической колебательной системы, состоящей из массы M и упругого элемента, например пружины, с жесткостью C. При этом массой M является колеблющейся масса воздуха в горле резонатора, а жесткость C определяется упругостью воздуха в объеме резонатора V. Эти величины могут быть представлены в виде:

$$M = \rho S_0 l; \qquad C = \rho c^2 S_0^2 / \mathrm{V}, \tag{1}$$

где ρ – плотность воздушной среды; c – скорость звука в ней.

Безразмерный импеданс резонатора Гельмгольца, определяемый отношением амплитуд звукового давления P к колебательной скорости V_0 у горла резонатора, равен:

$$Z_0 = P/V_0 = i\left(M\omega - C/\omega\right)/S_0 . \tag{2}$$

Равенство нулю импеданса Z_0 определяет собственную частоту резонатора ω_0. Более точная оценка ω_0 требует рассмотрения присоединенной длины горла резонатора l_a [1, 5], его эффективной длины $l_e = l + l_a$, а также эффективной массы $M_e = \rho S_0 l_e$.

Определение поглощения звука резонатором проводится в модели с термовязким погранслоем на стенках резонатора, в которой на стенках горла учитывается вязкий погранслой, а на полости резонатора - термический слой (рис. 1*б*). В этом случае определяющие импеданс резонатора величины M и C становятся комплексными.

В соответствии с [6] вводится в рассмотрение комплексная плотность воздуха в горле резонатора ρ_v, которая для круглого горла диаметром d_0 может быть представлена в виде

$$\rho_\nu = \rho[1 + (1–i)\Delta_\nu], \quad (3)$$

где d_0 – диаметр горла резонатора; $\Delta_\nu = 2\delta_\nu/d_0$; $\delta_\nu = (2\nu/\omega)^{1/2}$ – глубина вязкого погранслоя; ν – кинематическая вязкость воздуха, $\nu = 1.5\cdot10^{-5}$ м^2/с.

Комплексная скорректированная масса колеблющегося воздуха в горле резонатора

$$M_k = M[1 + l_a/l + (1–i)\Delta_\nu], \quad (4)$$

а комплексная скорректированная жесткость объема воздуха в полости резонатора [4, 7]

$$C_k = C(1 + i\Delta_\chi), \quad (5)$$

где $\Delta_\chi = S_\chi\delta_\nu/V$; S_χ – площадь внутренней поверхности полости резонатора; $\delta_\chi = (2\chi/\omega)^{1/2}$ – глубина термического погранслоя; χ – температуропроводность воздуха, $\chi = 2.1\cdot10^{-5}$ м^2/с.

Тогда безразмерный импеданс резонатора $Z_0' = Z_0/(\rho c)$ запишется в виде

$$Z_0' = 2kl\frac{\delta_\nu}{d_0} + \frac{S_0 S_\chi}{kV^2}\delta_\chi + i\left[kl\left(1 + \frac{l_a}{l} + \frac{2\delta_\nu}{d_0}\right) - \frac{S_0}{kV}\right], \quad (6)$$

$k = \omega/c$ – волновое число.

Далее в работе исследовался резонатор Гельмгольца с полостью цилиндрической формы диаметром d, длиной L и горлом диаметром d_0, длиной l, который располагался на конце импедансной трубы с внутренним диаметром равным $D = 99$ мм соосно с ее продольной осью (рис.2).

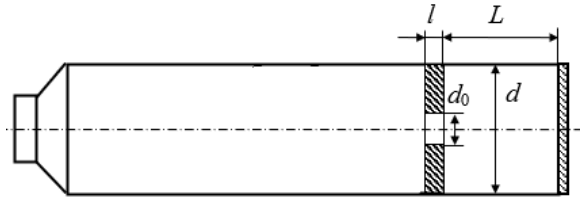


Рис. 2. Торцевой резонатор Гельмгольца в импедансной трубе

В этом случае рассматривается безразмерный импеданс торцевой стенки Z', который определяется через отношение звукового давления P к колебательной скорости V у торцевой стенки. Очевидно, имеет место соотношение $Z' = mZ_0'$, где $m = d^2/d_0^2$. Зная Z', можно определить коэффициент отражения торцевой стенки $R = (Z' - 1)/(Z' + 1)$, а затем и ее коэффициент поглощения $\alpha = 1 – |R|^2$.

С учетом (8) для рассматриваемого случая цилиндрического резонатора Гельмгольца получим следующее выражение для импеданса торцевой стенки:

$$Z' = 2mk\delta_\nu\left(\frac{l}{d_0} + E\right) + \frac{\delta_\chi}{kL^2}\left(1 + \frac{2L}{d}\right) + i\left[mkl\left(1 + \frac{l_a}{l} + \frac{2\delta_\nu}{d_0}\right) - \frac{1}{kL}\right]. \quad (7)$$

Первые два слагаемых в (7) определяют соответственно вязкое R'_ν и термическое R'_χ сопротивление резонатора. Заметим, что в этой формуле в отличии от формулы (8) в выражении для вязкого сопротивление с целью учета потерь на кромках горла добавлено еще постоянная

E, значение которой должна определяться по результатам экспериментальных исследований. Было сделано предположение, что наличие вязких потерь на кромках горла приводит одновременно и к уменьшению эффективной длина горла резонатора. В связи с этим, выражение для вязкого сопротивления в (7) было приведено к виду

$$R'_\nu = 2mk\delta_\nu \left[\frac{l/d_0}{(1+N\,d_0/l)} + E \right], \qquad (8)$$

где введена в рассмотрение еще одна постоянная *N*. Расчетные результаты показали хорошее соответствие с результатами измерений, когда входящие в формулу (8) постоянные принимали значения: *E*=1 и *N* =0.1.

Результаты

Исследовались частотные зависимости коэффициента поглощения α торцевой стенки с резонатором Гельмгольца расчетным и экспериментальными методами. Расчеты и измерения проводились при варьировании геометрических параметров резонатора: диаметра d_0 и длины горла l , а также длины полости резонатора *L*. При этом базовым являлся вариант резонатора с горлом диаметром d_0 =10 мм, длиной l = 2 мм и длиной полости резонатора *L* = 40 мм.

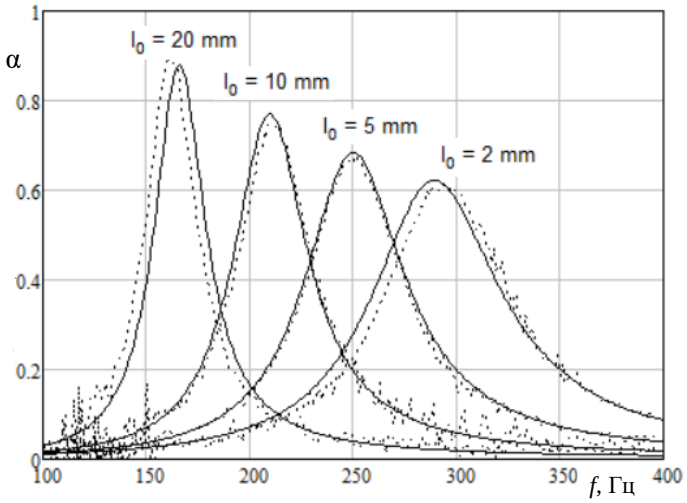


Рис. 4. Расчетные (——) и экспериментальные (·····) зависимости коэффициента поглощения от частоты при различных длинах горла резонатора.

Таким образом, поглощение резонатора Гельмгольца определяется тремя видами потерь звуковой энергии в нем (вязкими потерями на стенке горла резонатора; вязкими потерями на кромках горла и в окрестности горла; тепловыми потерями на стенках полости резонатора. Чтобы оценить степень влияния каждого из этих трех факторов на общее поглощение резонатора, рассмотрим общее безразмерное сопротивление резонатора R'_Σ, которое с учетом (7) и (8) может быть представлено в виде

$$R'_\Sigma = R'_\nu + R'_\chi = 2mk\delta_\nu \left[\frac{l/d_0}{(1+0.1d_0/l)} + 1 \right] + \frac{\delta_\chi}{kL^2}\left(1+\frac{2L}{d}\right). \qquad (9)$$

При этом наибольший интерес представляет поглощение резонатора Гельмгольца на его собственной частоте, соответствующей $k_0 = [S_0/(l_e \mathrm{V})]^{1/2}$. Учитывая это и пологая в первом приближении $l_a = d_0$, приведем формулу (9) к виду:

$$R'_\Sigma = 2mk_0\delta_\nu \left[\frac{l/d_0}{(1+0.1d_0/l)} + 1 + \sqrt{\gamma}\left(1+\frac{d_0}{l}\right)\left(\frac{l}{L}+\frac{2l}{d}\right)\right] = 2mk_0\delta_\nu \left(R_N + R_E + R_V\right). \qquad (10)$$

Первое слагаемое в квадратных скобках в (16), R_N, определяет вязкие потери на стенках горле, второе, R_E, − вязкие потери на кромках горла, а третье, R_V, − тепловые потери в объеме резонатора. Вязкие потери на стенках горла R_N определяются отношением l/d_0, а потерь на кромках величиной R_E=1. Тепловые потери зависят от большого числа переменных, таких как размеры полости резонатора и размеры его горла. Рассмотрим несколько частных случаев.

1. Резонатор с коротким горлом (l/d_0<<1). В этом случае, согласно (10), составляющая для вязких потерь в горле $R_N = (l/d_0)^2 \to 0$, так что этими потерями можно пренебречь. Что касается составляющей тепловых потерь R_V, в этом случае она определяется формулой:

$$R_V = \sqrt{\gamma}\left(d_0/L + 2\,d_0/d\right). \qquad (11)$$

Если при этом диаметр горла d_0 будет много меньше размеров полости резонатора, d_0<< L, d_0<< d, то тогда $R_V \to 0$ и следовательно тепловые потери $R_V << R_E$. Так как в этом случае и $R_N \to 0$, то определяющим фактором поглощения будут вязкие потери R_E. Если диаметр d_0 соизмерим с размерами полости резонатора, как в резонаторе с короткой полостью, $L \sim d_0$, то тогда $R_V \sim R_E >> R_N$.

2. Резонатор с параметрами горла l/d_0 =1. В этом случае

$$R_V = 2\sqrt{\gamma}\left(l/L + 2l/d\right). \qquad (12)$$

Когда параметры горла много меньше размеров полости резонатора, то тогда $R_V \to 0$. Если же параметры горла соизмеримы хотя бы с одним из параметров полости, очевидно прежде всего с длиной, то тогда в соответствии (12) $R_V \sim 1$. Так как при этом $R_N \sim 1$, то, следовательно, все три вида потерь будут вносить примерно одинаковый вклад в поглощение резонатора, $R_N \sim R_E \sim R_V$.

3. Резонатор с длинным узким горлом, когда составляющая $R_N = l/d_0 >> 1$). При этом другая составляющая

$$R_V = \sqrt{\gamma}\left(l/L + 2l/d\right) \qquad (13)$$

и оказывается в два раза меньшим, чем в предыдущем случае. При большой по сравнению с размерами полости длине горла, $l << L$, $l << d$, как и в предыдущем случае тепловые потери будут много меньше вязких потерь на кромках горла и тем более потерь в самом горле, $R_V << R_E << R_N$. Если длина горла резонатора l соизмерима с размерами полости резонатора, то $R_E \sim R_V << R_N$. Наконец, для резонатора с короткой полостью, когда ее длина $L \sim d_0$, составляющая

потерь в полости резонатора R_V, пропорциональная отношению l/L, становится соизмеримой с составляющие $R_N = l/d_0$, так что $R_V \sim R_N >> R_E$.

Заключение

Рассмотренная математическая модель резонатора Гельмгольца. В которой учитываются вязкими потери на стенке горла резонатора и на его кромках, а также тепловые потерями на стенках полости резонатора, позволила получить аналитическую оценку поглощения резонатора в зависимости от его геометрических параметров. При этом результаты расчета показали хорошее соответствие с экспериментальными результатами.

Заметим, что появившееся в последнее время статьях по поглощению звука резонатором Гельмгольца часто рассматривается случай резонатора с длинным горлом, например [8], ограничиваясь при этом учетом только вязких потерь звуковой энергии на стенках горла резонатора. Однако, как мы видим, это не всегда правомерно.

Список литературы

1. *Ingard U*. On the theory and design of acoustic resonators // J. Acoust. Soc. Am. 1953. V. 25, № 6. P. 1037–1061.
2. *Комкин А.И., Миронов М.А.* О диссипативной присоединенной длине отверстия перегородки в круглом канале // Акуст. журн. 2015. Т. 61. № 4. С. 442–446.
3. *Davis A.M.J., Nagem R.J.* Influence of viscosity on the diffraction of sound by a circular aperture in a plane screen // J. Acoust. Soc. Am. 2003. V. 113, № 6. P. 3080–3090.
4. *Комкин А.И., Миронов М.А., Быков А.И.* Поглощение звука резонатором Гельмгольца // Акустический журнал. 2017. Т. 63. № 4. С. 356–363.
5. *Комкин А.И., Быков А.И.* Инерционная присоединенная длина горла резонаторов Гельмгольца // Акуст. журн. 2016. Т. 62. № 3. С. 277– 287.
6. *Крендалл И.Б.* Акустика: Пер. с англ. М.: Комкнига, 2007. 172 с.
7. *Nolle A.W.* Small-signal impedance of short tubes // J. Acoust. Soc. Am. 1953. V. 25, № 1. P. 32–39.
8. *Huang S., Fang X., Wang X., et al.* Acoustic perfect absorbers via Helmholtz resonators with embedded apertures // J. Acoust. Soc. Am. 2019. V. 145, № 1. P. 254–262.

УДК 534.26 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39721

Экспериментальное исследование резонатора гельмгольца на стенке канала с потоком

Комкин А.И.[1,a], Матасова О. Ю. [1], Карнаухова Л.С.[1]
[1] МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия.
Тел.: 8-499-263-68-93;
E-mail: [a]akomkin@mail.ru

Аннотация: Рассмотрена методика экспериментальной оценки акустических характеристик резонатора Гельмгольца, размещенного на стенке канала при наличии в нем скользящего потока. По результатам измерений оценивается потери передачи глушителя. Измерения осуществляются с помощью системы из четырех микрофонов методом двух нагрузок. Основная проблема при проведении таких измерений состоит в том, что воздушный поток в канале является мощным источником помехи для измеряемых микрофонами сигналов, что существенно снижает точность получаемых результатов. В работе рассматривается способ выделения полезного сигнала с помощью адаптивной фильтрации. В результате использования такого подхода достоверность получаемых результатов была существенно повышена.

Ключевые слова: резонатор Гельмгольца, потери передачи, поток, измерения, помехи, фильтрация.
PACS: 43.58.Kr

Experimental study of a helmholz resonator on the wall of a flow channel

Komkin A.I.[1,a], Matasova O.Yu.[1], Karnaukhova L.S.[1]
[1] Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia.
Tel.: 8-499-263-68-93; E-mail: [a]akomkin@mail.ru

Abstract: This paper discusses a method for experimentally evaluating the acoustic characteristics of a Helmholtz resonator mounted on a duct wall in the presence of a grazing flow. The transmission losses of the silencer are estimated based on the measurement results. Measurements are performed using a four-microphone system with the two-load method. The main problem in conducting such measurements is that the airflow in the duct is a powerful source of interference for the signals measured by the microphones, which significantly reduces the accuracy of the results obtained. This paper discusses a method for extracting the

useful signal using adaptive filtering. As a result of using this approach, the reliability of the results obtained was significantly improved.

Keywords: Helmholtz resonator, transmission losses, flow, measurements, interference, filtering.

Введение

Экспериментальное определение акустических характеристик глушителей шума представляет собой не простую задачу, связанную с необходимость проведения большого количества измерений [1]. Задача еще больше усложняется , если измерения приводятся при наличии в каналах с глушителем скользящего воздушного потока [2-5].

Наличие воздушного потока в системе создает дополнительные помехи в измерительной системе и усложняет анализ полученных результатов, в особенности при измерении акустических характеристик резонатора Гельмгольца, где поток сказывается на эффективность шумоподавления на собственной частоте резонанса.

Основной акустической характеристикой глушителя шума являются потери передачи

$$TL = 10\log\frac{W_u^+}{W_d^+},$$

где W_u^+, W_d^+ — мощности звуковых волн, соответственно поступающих на вход глушителя и прошедших глушителя, при согласованной нагрузке на его выходе.

Максимальное значение потери передачи для резонатора Гельмгольца в канале принимают на собственной частоте резонатора, которая зависит от объема резонатора, площади поперечного сечения горла резонатора и его длины *l*. При наличии воздушного потока собственная частота резонатора увеличивается, а потери передачи на этой частоте снижаются.

Целью настоящей работы являлась разработка способа снижения влияния помехи, обусловленной наличием воздушного потока в канале, на результаты измерений акустических характеристик резонатора Гельмгольца в канале и проверка его эффективности от при проведении экспериментальных исследований.

Экспериментальная установка

Для проведения эксперимента с резонатором Гельмгольца на стенке канала с потоком был разработан экспериментально стенд и использовались измерительные приборы, представленные на рис. 1 и рис. 2 соответственно.

Экспериментальная установка представляет собой систему из труб с тройником, выполняющих функцию объединения воздушного потока, создаваемого вентилятором, и

звука динамика. Создавая таким образом аналог выпускной системы автомобиля с глушителем, через который проходит воздушный поток.

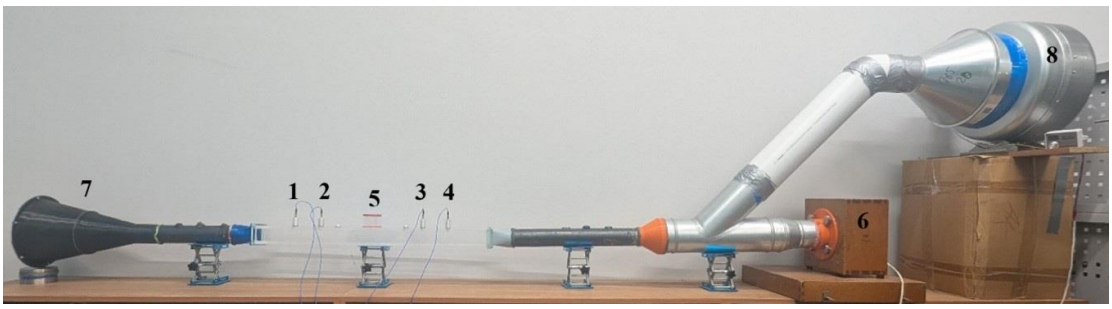


Рис. 1 – Стенд для проведения экспериментальных исследований характеристик глушителя шума: 1-4 — микрофоны; 5 —резонатор Гельмгольца; 6 — источник звука; 7 — согласованная нагрузка; 8 — вентилятор.

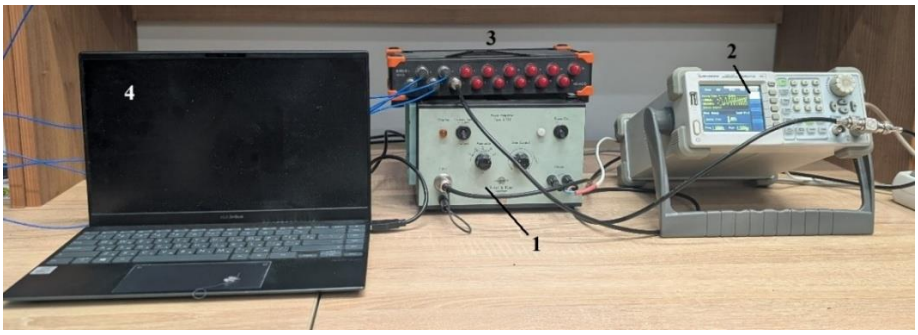


Рис. 2. Измерительные приборы: 1 — предварительный усилитель; 2 — генератор sweep сигнала; 3 — многоканальный регистратор сигналов; 4 — компьютер.

Воздушный поток проходя через тройник попадает в канал со стенками прямоугольного сечения 43×64 мм из оргстекла толщина 10 мм, которой по центру находиться отверстие диаметром 5 мм, соединяющим канал с резонатором Гельмгольца высотой 42 мм и диаметром 53 мм. А затем воздушный поток выходит через конец воздуховода, на котором установлена согласованная нагрузка в виде конуса с заполненным звукопоглощающим материалом, которая снимается при проведении измерений для выполнения условий двух нагрузок и получения качественных результатов характеристик глушителя методом двух нагрузок. На стенке канала установлены попарно с двух сторон от резонатора Гельмгольца плафоны с четвертьдюймовыми микрофонами, которые снимают показания в режиме реального времени и передают их в устройство анализатора сигнала, выводя данные на компьютер. Также с генератора sweep сигнала на компьютер поступает цифровой аналоговый сигнал идеального синуса, который необходим для дальнейшей обработки данных.

Обработка данных

В результате измерений производится запись 8 аудио файлов сигналов на 4-х микрофонах с двумя нагрузками и 1 цифровая запись со sweep сигналом, необходимых для

получения характеристики потерь передачи. Целью обработки данных является адаптивная фильтрация звукового сигнала от шумовых помех потока и на основе полученной обработки осуществление вычислений акустических характеристик резонатора Гельмгольца.

Фильтрация сигналов с каждого из микрофонов осуществляется при помощи адаптивного фильтра в среда MATLAB [2], схема которой представлена на рис. 3.

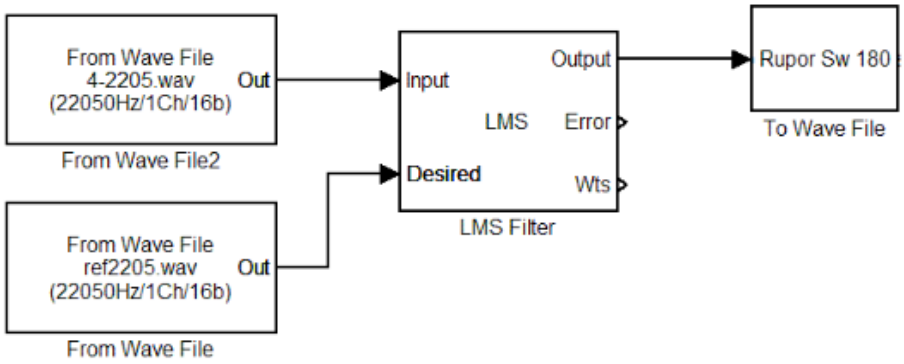


Рис.3. Реализация адаптивного фильтра в среде MATLAB

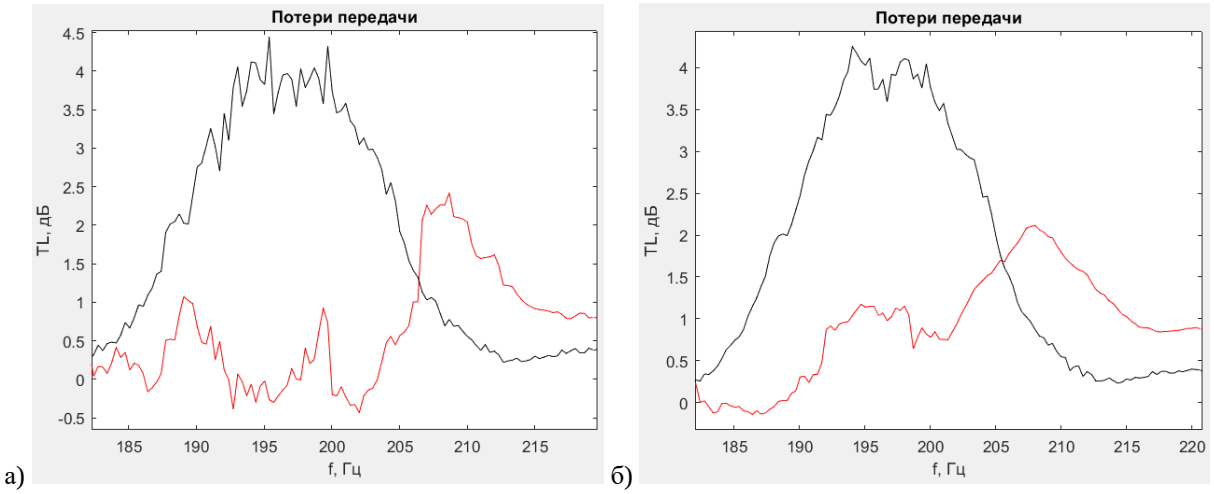
В систему фильтрации звукового сигнала для аудиодорожки на каждом микрофоне подается запись с микрофона и с оцифрованного sweep сигнала. В результате фильтрации из звуковой дорожки каждого микрофона удаляются помехи, создаваемые потоком. Записи отфильтрованных сигналов используются для получения передаточных функций между сигналами с первого микрофона и остальными тремя микрофонами для чего предварительно осуществляется получение спектральных характеристик этих сигналов на основе преобразования Фурье. Для получения характеристик потери передачи *TL* используется методика расчета матричным методом расчета с двумя нагрузками [1]. Также для корректной интерпретации результатов используется сглаживания графиков при обработке в MATLAB.

Результаты

В результате обработки данных получены потери передачи резонатора без потока и со потоком при скорости воздушного потока V=10 м/с. Как видно на рис. 4 при отсутствии потока использование адаптивной фильтрации практически не влияет на график потери передачи резонатора Гельмгольца на стенке канала. Собственная частота резонатора при отсутствии потока находиться в районе 195 Гц, а его акустическая эффективность составляет порядка 4 дБ.

Рис. 4а показывает без использования адаптивной фильтрации на спектрах присутствует несколько резонансных пиков, которые исчезают при наличии фильтрации на рис. 4б. Можно четко определить собственную частоту резонатора Гельмгольца при наличии потока, которая смещается до 210 Гц, при этом наблюдать снижение общей эффективности

до 2 дБ, что подтверждается результатами расчетов по при численном моделировании резонатора Гельмгольца на стенке канала с потоком [6].



а) б)

Рис. 4. Потери передачи резонатора Гельмгольца без потока (—) и с потоком (—)

а) без фильтрации, б) с фильтрацией

Заключение

Измерение акустических характеристик резонатора Гельмгольца в канале с потоком с использованием адаптивной фильтрации сигналов с микрофонов и сглаживание результатов помогает повысить точность и достоверность получаемых результатов.

Список литературы

1. Комкин А.И., Никифоров Н.А. Современные методы измерения акустических характеристик однородных звукопоглощающих материалов // Безопасность жизнедеятельности. − 2006. − № 8. − С. 22–26.
2. O. Olivieria J. S. Bolton. Measurement of transmission loss of materials using a standing wave tube. Proceedings of INTER-NOISE 2019. Honolulu, USA, 3-6 December 2006. 8 p.
3. Yudin, G. Nadareyshvili, A. Chertishchev. Experimental method with increased accuracy for determining acoustic characteristics of exhaust system elements // Proceedings of the 27-th International Congress on sound and vibration. 11-16 July, 2021. 4 p.
4. Быков А.И., Матасова О.Ю., Комкин А.И., Богомолова В.В. Поляченко А.А. Особенности измерения акустических характеристик глушителей шума методом четырех микрофонов. Акустика среды обитания: сборник трудов IX Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2024. С. 74–82.

5. Muller S., Massarani P. Transfer-Function Measurement with Sweeps: Director’s Cut Including Previously Unreleased Material // Journal of the Audio Engineering Society. 2001. Vol. 49, № 6. P. 443–471.
6. Матасова О.Ю., Комкин А.И., Быков А.И. Влияние скользящего потока на акустические характеристики резонатора Гельмгольца // Известия вузов. Машиностроение. 2025. № 7. С. 84–94.

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39722

Пассивные системы шумоподавления на основе резонансных структур

Бикмухаметов Ф.Р.[1)], Никитин В.В.[1)], Бучкин И.К.[1)], Рожин А.М.[1)], Красиков С.Д.[1)], Красикова М.В.[1)]

[1)] ООО «Деволм», Санкт-Петербург

E-mail: bfr@devolm.ru

В докладе приведён обзор решений для промышленного и бытового шумоподавления, разрабатываемых ООО «Деволм». В частности, продемонстрированы шумозащитные короба для промышленного оборудования, основанные на массиве резонаторов Гельмгольца. Помимо этого, приведены примеры настенных панелей для низкочастотного шумопоглощения, также основанных на резонаторах Гельмгольца. Также в докладе будут рассмотрены структуры для шумоизоляции вентиляционных систем, основанные на эффекте звуковых чёрных дыр.

Ключевые слова: шумоподавление, резонансные структуры, промышленное шумоподавление, акустические черные дыры, шумозащитные короба

Passive noise reduction systems based on resonant structures

Bikmukhametov F.R.[1)], Nikitin V.V.[1)], Buchkin I.K.[1)], Rozhin A.M.[1)], Krasikov S.D.[1)], Krasikova M.V.[1)]

[1)] Devolm LLC, Saint Petersburg

E-mail: bfr@devolm.ru

The report provides an overview of industrial and domestic noise reduction solutions developed by Devolm LLC. Noise-proof boxes for industrial equipment based on an array of Helmholtz resonators are demonstrated. In addition, examples of wall panels for low-frequency noise absorption, also based on Helmholtz resonators, are given. The report will also consider structures for sound insulation of ventilation systems based on effect of sound black holes.

Keywords: noise reduction, resonant structures, industrial noise reduction, acoustic blackholes, noise protection boxes

Назад к содержанию секции

СЕКЦИЯ БИОАКУСТИКА



назад к Содержанию

СОДЕРЖАНИЕ СЕКЦИИ БИОАКУСТИКА

1. ПРИЗНАКОВОЕ ОПИСАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ШУМОВ ПЧЕЛИНОЙ СЕМЬИ В ПЕРИОД ПОДГОТОВКИ К СОЦИОТОМИИ
Тобоев В.А. 1416

2. АДАПТАЦИОННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ЭХОЛОЦИРУЮЩИХ ЖИВОТНЫХ ПО ОПТИМИЗАЦИИ СИГНАЛОВ И ПОВЕДЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ ОХОТЫ И ПОИСКА ОБЪЕКТОВ В УСЛОВИЯХ АКУСТИЧЕСКИХ ПОМЕХ
Ахи А.В., Лупанова А.С. 1424

3. ИМИТАЦИЯ ЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ ЛАРГ PHOCA LARGHA, СОДЕРЖАЩИХСЯ В ПРИМОРСКОМ ОКЕАНАРИУМЕ
Горовой С.В., Катин И.О. 1430

4. ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОДНОЙ ФАУНЫ
Кондрашов Н.Я., Ганциевский А.В., Старченко И.Б., Ганущак Е.М., Кордуманов Н.М. 1436

5. ВЛИЯНИЕ НИЗКОЧАСТОТНОГО ШУМА НА ПОВЕДЕНИЕ БЕЛОМОРСКИХ МИДИЙ MYTILUS EDULIS L
Лезин П.А., Халаман В.В., Британков А.К., Касьянов Д.А. 1442

6. РЕАКЦИИ НЕЙРОНОВ СЛУХОВОЙ КОРЫ НЕАНЕСТЕЗИРОВАННОЙ КОШКИ НА РАЗНООБРАЗНЫЕ АНТРОПОГЕННЫЕ ЗВУКИ
Бибиков Н.Г., Пигарев И.Н. 1448

7. ОБ УПОРЯДОЧЕННОСТИ ВРЕМЕННОЙ СТРУКТУРЫ СПОНТАННОЙ АКТИВНОСТИ НЕЙРОНОВ СЛУХОВЫХ ЦЕНТРОВ МОЗГА
Егорова М.А., Акимов А.Г., Хорунжий Г.Д. 1454

8. СВОЙСТВА СУММАРНЫХ СЛУХОВЫХ ОТВЕТОВ СТВОЛА МОЗГА КРЫС В УСЛОВИЯХ НАРУШЕНИЯ ФУНКЦИИ ТРАНСПОРТЕРА ДОФАМИНА DAT-1
Хорунжий Г.Д., Егорова М.А. 1455

9. ПИЛОТНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ИЗУЧЕНИЮ ВОЗДЕЙСТВИЯ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ АНТРОПОГЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ НА СЕРОГО ТЮЛЕНЯ В АКВАТОРИИ БАРЕНЦЕВА МОРЯ
Британков А.К., Зайцев А.А., Пахомов М.В., Салин М.Б., Яковлев А.П. 1462

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39723

Признаковое описание акустических шумов пчелиной семьи в период подготовки к социотомии

В.А.Тобоев

ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова»
428015, Россия, Чебоксары, Московский пр., 15
E-mail: stoboev@gmail.com

Аннотация. В работе изучена динамика акустических процессов, сопутствующих дифференциации пчелиной семьи по физиологическому состоянию, сопряженному с подготовкой к социотомии, выражающейся в отделении части пчел от материнской семьи. Полагается, что упорядоченность частотно-временной структуры звукового шума пчел имеет отношение к консолидации членов пчелиной семьи, в том числе и группы физиологически молодых пчел, готовящихся составить новую семью. Для описания нестационарного акустического шума предложен метод структурного моделирования, основанный на выделение статистически однородных фрагментов оптимальной длительности. Найдены количественные характеристики шума, образующие кластер параметров по отношению к моменту приближения социотомии. В дополнение к этим количественным параметрам представлено спектральное оценивание выделенных фрагментов ограниченной длительности модифицированным методом Прони. Для этого статистически однородные участки заменялись конечным набором гармоник, содержащим информационно-значимую и ограниченную совокупность (k<30) не кратных друг другу частот. Преимуществом такого подхода является возможность нахождения границ частотного положения концентрации спектральной энергии внутри выделенных участков. Предложенные временные и частотные количественные параметры звукового шума пчел позволяют с высокой надежностью определять степень готовности к вылету из улья новой семьи.

Ключевые слова: медоносные пчелы, акустический сигнал, социотомия, последовательность ранжированных амплитуд, частота

A SYMBOLIC DESCRIPTION OF ACOUSTIC NOISE OF A BEE COLONY DURING THE PERIOD OF PREPARATION FOR SOCIOTOMY

V.A. Toboev

I. N. Ulyanov Chuvash State University, Chebokary 428015 Russia,

Abstract. This study examines the dynamics of acoustic processes associated with the differentiation of a bee colony based on its physiological state, which is associated with preparation for sociotomy, which involves the separation of some bees from the mother colony. It is believed that the orderliness

of the frequency-temporal structure of bee sound is related to the consolidation of colony members, including a group of physiologically young bees preparing to form a new colony. To describe non-stationary acoustic noise, a structural modeling method is proposed based on the identification of statistically homogeneous fragments of optimal duration. Quantitative noise characteristics are identified, forming a cluster of parameters relative to the moment of approaching sociotomy. In addition to these quantitative parameters, a spectral evaluation of the identified fragments of limited duration is presented using a modified Prony method. To achieve this, statistically homogeneous regions were replaced by a finite set of harmonics containing an informationally significant and limited set (k<30) of frequencies that are not multiples of each other. The advantage of this approach is the ability to determine the frequency boundaries of spectral energy concentrations within the identified regions. The proposed temporal and frequency quantitative parameters of bee sound noise allow for a highly reliable determination of the readiness of a new colony to leave the hive.
Keywords: honey bees, acoustic signal, sociotomy, sequence of ranked amplitudes, frequency

ВВЕДЕНИЕ

Семья медоносной пчелы состоит из нескольких десятков тысяч особей и представляет собою консолидированную группу родственных, взаимосвязанных и взаимозависимых организмов, не способных к длительному самостоятельному существованию и размножению [1]. У эусоциальных видов действию естественного отбора и других факторов эволюции подвергаются не отдельные особи, а образуемые ими семьи.

Наиболее актуальной задачей для практического пчеловодства является выявление пчелиных семей, готовящихся к социотомии (socio – соединять, объединять и tome – разрезание). Размножение и расселение пчелиных семей происходит посредством отделения от материнской семьи большей части рабочих особей с оплодотворенной или неоплодотворенной маткой и занимает от нескольких дней до нескольких недель. В этот период значительная часть пчел устраняется от пополнения кормовых запасов, строительства сотов, кормления личинок и др., что ведет к снижению продуктивности пчелиных семей. Отделяющиеся пчелы, покидая материнскую семью, стремятся обосноваться как можно дальше от нее [2-4]. Поэтому пчеловоду необходимо выявлять семьи, готовящиеся к социотомии, и знать о вероятном времени завершения этого процесса.

Диагностике физиологического состояния пчелиных семей в период социотомии по частотной структуре генерируемых ими звуков посвящено большое количество специальных исследований [2,6-10]. Многие исследователи отмечают сильную активизацию пчел перед непосредственным моментом отделения семьи. За несколько часов до расселения некоторые рабочие пчелы «возбуждаются» и «начинают волнами бегать взад и вперед и жужжанием возбуждают остальных рабочих пчел» [5]. Эти возбуждения приводят к изменению частотных

составляющих акустических сигналов и параметров внутриульевого микроклимата. Однако длительность периода возбуждения пчел перед вылетом из улья нельзя рассматривать как стандартный параметр, позволяющий прогнозировать роение, так как такое возбуждение длится от 10 мин до 1.5 ч. Также к бесперспективным относятся попытки выявления на пасеке размножающихся семей по изменению внутригнездовой температуры, влажности, т.к. эти параметры микроклимата улья зависят от численности пчел, внешней температуры, влажности, а также от продуктивности кормового участка.

Установлено, что с социотомией связаны специфические изменения в спектре акустического шума, генерируемого пчелиными семьями. Но практическое использование результатов осложняется их противоречивостью. Так, по данным Еськова [2], подготовка пчелиных семей к социотомии сопряжена с усилением спектральных составляющих в диапазоне 210–240 Гц за 3-5 дней до расселения. После завершения социотомии в указанном диапазоне остается один пик интенсивных составляющих с частотой, зависящей от активности пчел. Златова и др.[7] наблюдали увеличение спектральной плотности мощности примерно на 200 Гц по сравнению с периодом после отделения части пчел. В другом исследовании [8] результаты показали увеличение частоты во время социотомии с 150 Гц до 500 Гц с выраженным максимумом на частоте 300 Гц, а также наблюдалось увеличение общей амплитуды сигнала. Обзор наиболее интересных подходов анализа звуков медоносных пчел в период социотомии, предложенных за последние годы, можно найти в работах [9,10].

Работа посвящена изучению динамики акустических процессов, сопутствующих дифференциации пчелиной семьи по физиологическому состоянию, сопряженному с подготовкой к социотомии. Предпринята попытка выявить изменения состояния пчел по временно-частотной структуре генерируемых ими звуков на основе идентификации их статистически однородных (наиболее сильно-коррелированных) и часто повторяющихся его реализаций (фрагментов). Выделенные участки имеют одинаковую структуру и не содержат звуков отдельных пчел, представляющих собой локальные участки с неупорядоченными и нехарктерными компонентами. Участки с одинаковой статистической структурой шума (кластеры) анализируются во временной и в частотной областях.

1. СПЕЦИФИКА ВРЕМЕННОЙ СТРУКТУРЫ АКУСТИЧЕСКОГО ШУМА ПЧЕЛ

Суммарный акустический шум пчелиной семьи складывается из многих составляющих, которые генерируются отдельными особями. Их интенсивность, временная и частотная структуры зависят от физиологического состояния пчел.

Описание нестационарного акустического шума пчелиной семьи в процессе подготовки к социотомии и других ее состояний возможно при использовании элементов структурного

моделирования по его выделенным (чаще всего встречающимся) фрагментам [1]. Они, коррелируя с физиологическим состоянием членов пчелиной семьи, отражают его изменения.В качестве динамического критерия нестационарности удобно рассматривать характер изменения функции $\Gamma_k\ t,\tau$ при последовательном смещении пробного интервала по всей длине имеющегося исходного акустического сигнала или его разбиении на равные интервалы длительности τ, с последующей оптимизацией:

$$\Gamma_k\ t,\tau\ = \left|1-\gamma_k\ t,\tau\ \right|,$$

где $\gamma_k\ t,\tau$ представляет собой отношение функции обобщенного среднего (ФОС) для различных фрагментов рассматриваемого сигнала:

$$\gamma\ t_k,\tau\ = \frac{G_p\ t_{k+1},\tau}{G_p\ t_k,\tau} = \left\{\frac{\Delta_p\ t_{k+1},\tau}{\Delta_p\ t_k,\tau}\right\}^{1/p}.$$

Для реализаций случайной переменной $x\ t$ из выбранного интервала $\left[t_k,t_k+\tau\right]$ абсолютный момент порядка *p* определяется выражением:

$$\Delta_p\ t_k,\tau\ = \frac{1}{m+1}\sum_{j=0}^{m}\left|x\ t_{k+j}\ -\left\langle x\right\rangle\right|^{p},\quad 0<p<\infty.$$

Здесь $\left\langle x\right\rangle$ обозначает среднее значение случайной переменной в интервале $\left[t_k,t_k+\tau\right]$, $x_{k+j}=x\ t_k+j\cdot\Delta\tau\ ,\ j=0,1,...,m$, где временной сдвиг τ выражен через время дискретизации ($\tau=m\cdot\Delta\tau$). Временные интервалы τ и $\Delta\tau$ определяются характерными временами, наиболее важными для динамики изменения исследуемого акустического сигнала. Для нестационарного сигнала имеется набор характерных временных интервалов τ, определяемых его локальной структурой.

Задав границы изменения функции $\gamma_k\ t,\tau$ (например, $0.9\le\gamma\ t_k,\tau\ \le1.1$) можно выделить сильно-коррелированные (статистически однородные) участки сигнала при найденной длине участков фрагментации и оптимизировать начала выбранных фрагментов. В случае стационарности сигнала $\gamma_k\ t,\tau\ =1.$

В терминах функции обобщенного среднего два выделенных фрагмента анализируемого звукового сигнала пчел определяются как сильно-коррелированные, если выполняется соотношение:

$$G_p\ t_{k+1},\tau\ \simeq a\,G_p\ t_k,\tau\ +b\,.$$

На следующем этапе методом рекуррентного интегрирования выявляются основные тенденции изменения амплитудных значений в выделенных участках анализируемого шума

по их убыванию. Они выделяются по последовательности ранжированных амплитуд относительных флуктуаций (ПРАОФ). Последовательность ранжированных амплитуд содержат в себе всю первоначальную информацию, полученную из исходных данных, и является неинвазивной статистической количественной характеристикой. Это позволяет сравнивать статистически однородные участки по величине функции корреляции и детектировать внутренние (т.е. не навязанные исследователем) диагностические признаки.

Ситуации, в которых (Y_0) является последовательностью ранжированных амплитуд с известными числовыми характеристиками, а (Y_n) отражает исследуемую последовательность, то по зависимостям $Y_n(Y_0)$ можно сопоставлять эти два акустических шума. Поскольку функции Y_n Y_0 различны и ФОС для относительных флуктуаций шума также имеют различные количественные характеристики, то их можно использовать для идентификации и количественной дифференциации подготовки пчелиных семей к социотомии. Эта идея была с успехом применена в работе [11].

Если возникает необходимость более детального описания и сравнения различных участков сигнала, огибающие последовательности ранжированных амплитуд удобно заменить подгоночными функцией $F(t)$ вида:

$$F(t) = \sum_{i=1}^{m} C_i e^{\lambda_i t} \cdot \qquad (1)$$

Вычисленные подгоночные параметры функции $F(t)$ позволяют разделить амплитуды нестационарного акустического шума на некие оптимальные статистические группы с параметрами (C_m, λ_m). Эти параметры позволяют количественно сопоставить произвольные участки анализируемого сигнала и разделить их во временной области по признаковым отличиям.

Анализ ПРАОФ с экспоненциальной зависимостью (1) подгоночных параметров указывает на возможность прогнозирования изменений физиологического состояния пчел в период подготовки пчелиной семьи к расселению от материнской семьи. Для этого необходимо определить усредненные параметры (C_m, λ_m) на завершающем этапе подготовки к социотомии. Степень предсказуемости социотомии оценивается посредством сопоставления найденных подгоночных параметров для разных семей с эталонными (опорными).

2. СПЕЦИФИКА ЧАСТОТНОЙ СТРУКТУРЫ АКУСТИЧЕСКОГО ШУМА ПЧЕЛ

Традиционные способы определения спектра сигнала ограниченной длительности основанные на использовании Фурье- и вейвлет–разложений не всегда эффективны при

гармонической аппроксимации и обладают существенными недостатками, вытекающими из предлагаемых способов определения гармоник. Так спектральные разложения, основанные на методе Фурье и различных его модификациях, обладают значительной избыточностью по количеству гармоник и не обеспечивают приемлемого значения ошибки аппроксимации сигналов ограниченным набором гармоник. Частотные характеристики акустического шума пчел без выделения статистически однородных участков не позволяют выявлять диагностические признаки.

Поэтому актуальной является постановка и решение следующей практически важной задачи: акустический сигнал, заданный на выборке ограниченной длительности, представить конечным набором гармоник K

$$F\left(t_n\right) = A_0 + \sum_{k=1}^{K}[A_k \cos(\omega_k nT / N) + B_k \sin(\omega_k nT / N)], \qquad (2)$$

содержащим конечную совокупность нецелых (некратных друг другу) частот, входящих в неортогональные комбинации периодических функций. Здесь $t_n = n \cdot \Delta t, t_0 = 0; t_N = T$, $\Delta t = T/N$; N – число отсчетов сигнала длительностью T.

Напрямую процедура аппроксимации выделенных статистически однородных участков функцией вида (2) не может быть реализована, так как она изначально содержит $3K+1$ подгоночных параметра (частоты ω_k и амплитуды A_0, A_k, B_k) и пределы полосы частот $\omega_{\min} \le \omega \le \Omega_{\max}$ *a priory* также неизвестны. Для того чтобы продвинуться в решении этой трудной проблемы необходимо сократить число неизвестных частот ω_k и постараться найти зависимость неизвестной частоты от номера гармоники k. Для сильно-коррелированных акустических сигналов такая зависимость частоты от номера гармоники $\omega_k = f\left(k\right)$ удовлетворяет следующим соотношениям

$$\omega_{k+p} = \alpha_1 \omega_{k+p-1} + \alpha_2 \omega_{k+p-2} + ... + \alpha_p \omega_k, \quad \sum_{s=1}^{p} \alpha_s = 1.$$

При $p = 2$ неизвестный набор частот может быть представлен в виде

$$\omega_k = \omega_{\min} + \frac{k-1}{K-1}\left(\Omega_{\max} - \omega_{\min}\right), \; k = 1, ..., K, \qquad (3)$$

$$\omega_k = \omega_{\min} \left(\frac{\Omega_{\max}}{\omega_{\min}}\right)^{\frac{k-1}{K-1}}, \; k = 1, ..., K. \qquad (4)$$

Некоторые приложения и несомненные достоинства этих зависимостей для решения ряда нетривиальных проблем отражены в публикации [12]. В этой же работе дается обоснование (3) и (4) на основе линейного принципа сильно-коррелированных переменных,

который помогает классифицировать статистически однородной зависимости и отделить эти случаи от других, где зависимости $\omega_k = f(k)$ остаются неизвестными.

При практическом применении формул (3)-(4) появляется сложность в определении минимального числа гармоник K и нахождение границ $\omega_{\min}, \Omega_{\max}$, задающих искомую полосу частот. Для решения этой задачи можно применить метод собственных координат [12] и использовать критерий аппроксимации по минимальной величине относительной ошибки.

Амплитудно-частотная характеристика сигнала (АЧХ) определяется величинами $A_0, (A_1, B_1, \omega_1), ..., (A_K, B_K, \omega_K)$, которые находятся методом наименьших квадратов с учетом выполнения дополнительных условий, связывающих ошибку аппроксимации и количество гармоник. Возможны следующие варианты оптимизации АЧХ:

а) выбирается минимальное число гармоник K при заданной точности аппроксимации δ;

б) выбирается минимальная ошибка аппроксимации δ при заданном значении K;

в) выбирается минимальное значение K при $\delta = 0$.

Аппроксимация статистически однородных участков в заданном временном интервале, конечным набором гармонических составляющих, дает дополнительную информацию в форме амплитудно-частотных характеристик, определяющих поведение пчел в период социотомии. Детализация анализа достигается путем количественного сравнения параметров аппроксимации. При этом, как показывают предварительные расчеты зависимости частоты от номера гармоник (3), полное число мод, определяющих частотную полосу с величиной относительной ошибки $\delta(K) < 5\%$, попадает в диапазон $K \in [15, 30]$.

Заключение

Звуковой шум, генерируемый пчелиной семьей, представляет собой во многом случайный процесс, но его временно-частотная структура характеризуется выраженной упорядоченностью, зависящей от физиологического состояния пчел и экологической ситуации. Описание нестационарного акустического шума пчелиной семьи в процессе подготовки к социотомии и других ее состояний возможно при использовании элементов структурного моделирования по его выделенным (чаще всего встречающимся) фрагментам. Они, коррелируя с физиологическим состоянием членов пчелиной семьи, отражают его изменения. Подготовка к социотомии связана с увеличением численности группы физиологически молодых пчел, что сопутствует повышение вероятности генерации статистически однородных участков, которые выделяются из общего шума в последовательности ранжированных амплитуд. Следовательно, пчелиная семья, дифференцируясь по физиологическому состоянию, дифференцируется и по структуре генерируемых ею звуков.

Для выделения области информативных признаков, характеризующих состояние пчел в период социотомии, необходимы два подмножества признаков: временные и спектральные. Выбор этих признаков производится в два этапа: первоначально в акустическом шуме выделяются статистически однородные и часто повторяющихся фрагменты, которые представляют «истинные» звуки пчел, готовящихся к расселению. Выделенные участки имеют одинаковую структуру и не содержат звуков отдельных пчел, т.е. локальных участков с резкими и нехарактерными особенностями. На следующем этапе кластеризованные участки ограниченной длительности с одинаковой статистической структурой подвергаются спектральному анализу с целью идентификации готовность пчелиных семей к социотомии.

Автоматизированное решение задачи анализа результатов инструментальных исследований акустических шумов пчел должно завершиться определением сроков отделения части пчел от материнской семьи. При этом необходимо уверенно решать задачи распознавания готовности пчел к социотомии. Полученные количественные параметры позволяют формировать архив записей паттернов (повторяющихся закономерностей) акустических шумов пчел, находящихся в разных физиологических состояниях в период подготовки к расселению части пчел от материнской семьи.

Список литературы

1. *Еськов Е.К., Тобоев В.А*. Изменение структуры звуков, генерируемых пчелиными семьями в процессе социотомии. //Зоологический журнал. 2011. №2.С.192
2. *Еськов Е*.К. Акустическая сигнализация общественных насекомых. Наука. М. 1979.
3. *Camazine S., Visscher P.K., Finley J., Vetter R.S*. House hunting by honey bee swarms: collective decsions and individual behaviors // Insectes Soc. 1999. V. 46. P. 348.
4. *Seeley T.D., Buhrman S.C.* Group decision making in swarms of honey bees // Behav. Ecol. Sociobiol. 1999. V. 45. P. 19.
5. *Winston M.L.* The biology of the honey bee. Harvard University Press, Cambridge. 1987.
6. *Michelsen A., Kirchner W.N., Lindauer M.,* 1986. Sound and irrational signals in the dance language of the honeybee. Apis mellifera // Behav. Ecol. Sociobiol. V. 18. P. 207.
7. *Zlatkova, A.; Kokolanski, Z.; Tashkovski, D.* Honeybees swarming detection approach by sound signal processing. In Proceedings of the 2020 XXIX International Scientific Conference Electronics (ET), Sozopol, Bulgaria, 16–18 September 2020. P.1.
8. *Ferrari S., Silva D., Guarino M., Berckmans D.* Monitoring of swarming sounds for early detection of the swarming period // Computers and Electronics in Agriculture. 2008.V. 64. P. 72.
9. *Terenzi, A.; Cecchi, S.; Spinsante, S*. On the Importance of the Sound Emitted by Honey Bee // Hives. Vet. Sci. 2020. 7. P.168.
10. *Uthoff, C., Homsi, M. N., and von Bergen, M.* (2023). Acoustic and vibration monitoring of honeybee colonies for beekeeping-relevant aspects of presence of queen bee and swarming. // Computers and Electronics in Agriculture, 2023. P.205.
11. *Еськов Е.К., Тобоев В.А*. Анализ статистически однородных фрагментов акустических шумов, генерируемых скоплениями насекомых// Биофизика. 2010. Т. 55. Вып. 1. С. 113.
12. *Nigmatullin R. R., Osokin S. I., Toboev V.* A. NAFASS: Discrete spectroscopy of random signals // Chaos, Solitons & Fractals. 2011. V. 44. P.

УДК: 57.084.1 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39724

Адаптационные возможности эхолоцирующих животных по оптимизации сигналов и поведения в процессе охоты и поиска объектов в условиях акустических помех

Ахи А.В., Лупанова А.С.
ФГБУН Институт эволюционной физиологии и биохимии им. И.М. Сеченова РАН, СПб,194223, пр. М. Тореза 44
Ленинградский зоопарк, СПб,197198, Александровский парк, 1, лит. А
Email: andrey.akhi@gmail.com, aslupanova@gmail.com

Доклад представляет обзор биоакустических исследований эхолокационной и поведенческой адаптации летучих мышей и морских животных в процессе охоты и обнаружения объектов в условиях реверберационных помех. Показано, что такие разные виды наземных и водных животных, обладающие общими способностями к эхолокации, находят общие пути решения стоящей перед ними задачи. И те, и другие осуществляют похожую подстройку эхосигналов и поведенческой стратегии для эффективной отстройки от помехи и нахождения оптимальных точек и направлений локации.

Ключевые слова: эхолокация, реверберация, адаптация, поиск, обнаружение.

Echolocating animals adaptive capabilities to optimize signals and behavior during hunting and searching for objects in acoustic interference conditions

Akhi A.V., Lupanova A.S.
Sechenov Institute of Evolutionary Physiology and Biochemistry RAS, St. Petersburg, 194223, Russia
Leningrad Zoo, St. Petersburg, 197198, Russia
Email: andrey.akhi@gmail.com, aslupanova@gmail.com

The proceeding presents the bioacoustics studies review of bats and marine animals echolocation and behavioral adaptation during hunting and objects detection in reverberation interference conditions. It has been shown that such different species of terrestrial and aquatic animals, possessing echolocating abilities, find common ways to solve the problem facing them. Both of them perform similar tuning of echosignals and behavioral strategy to effectively tune out interference and find optimal locations and directions.

Keywords: echolocation, reverberation, adaptation, search, detection.
PACS: 43.60

Введение (разнообразие эхолокации в природе)

В процессе эволюции у многих видов животных возник особый способ ориентации и навигации в пространстве, а также поиска и добывания пищи, основанный на излучении звуковых сигналов и анализе отраженного от объектов эха. Такая способность, которую мы называем эхолокацией, является незаменимым сенсорным средством получения информации в условиях плохой видимости. Она особенно важна и незаменима для животных, ведущих активный ночной образ жизни, обитающих в пещерах или под землей, а также для многих водных животных, поскольку в воде, которая часто бывает мутной, зрительная информация доступна лишь на ближней дистанции. В условиях плохой видимости или его отсутствия акустическая эхолокация является замещением зрения, у некоторых видов - полноценным, у некоторых – просто дополнительным источником информации об окружающей среде. Наиболее развитой эхолокацией обладают летучие мыши и китообразные. Одним из наиболее эхолокационно развитых видов летучих мышей является Eptesicus fuscus, а у китообразных – афалины Tursiops truncatus, впрочем, достаточно развитой эхолокацией обладают все виды отряда рукокрылых и отряда китообразных. Но на менее развитом уровне эхолокацией обладают многие виды животных. По убыванию ее развития можно отметить некоторые виды землероек (Sorex, Blarina) и тюленей. Среди птиц она наиболее выражена у гуахаро и саланганов. Эхолокация у этих видов происходит на низких частотах (2 – 20 кГц), и она не является точным средством поиска малых объектов, но позволяет ориентироваться в пространстве, получать информацию о препятствиях и крупных объектах. Еще меньше она развита у песцов, полевых мышей, кротов и т д. У насекомых простейшей эхолокацией обладают совки и некоторые ночные бабочки. Эти виды используют ее для ориентации в темноте и как некоторую помощь при охоте. Минимальной эхолокацией способен обладать и человек. Издавая звук, не обязательно голосом, и анализируя эхо, мы можем получать информацию об окружающем пространстве и об объектах, находящихся в нем. Этот навык не является для человека врожденным, часто он приобретенный или освоенный до определенного уровня. В силу необходимости его осваивают слепые люди.

Совершенное развитие эхолокационных способностей летучих мышей и китообразных позволяет им получать точную информацию об окружающих объектах и их свойствах, размеры которых могут быть чрезвычайно малы. Так, летучие мыши с расстояния нескольких метров обнаруживают проволоку толщиной 0.1 мм, а дельфины с такого же расстояния различают и классифицируют малоразмерные (10 – 20 мм) мишени по материалу. В сложных акустических условиях и те, и другие способны

адаптивно менять структуру зондирующих сигналов и локационное поведение (траекторию движения и лоцирование под разными углами и с разного расстояния). Это бывает необходимо для получения достаточной неискаженной информации в условиях сильных помех, самой значимой из которых, обычно является реверберация.

Эхолокационная адаптация летучих мышей

В пещерах, являющихся местом обитания и охоты летучих мышей, часто возникает сильная реверберация звука из за сложной границы воздух-камень/грунт. Возможна реверберация и в густой растительности, где они также могут охотиться. В таких условиях охота и поиск жертвы требуют моментальной реакции сенсорного внимания и моторики на эхосигналы от добычи и их слуховую идентификацию. В разных местах охоты животных возможна и разная по характеру реверберация. Они могут в полете охотиться на летающих насекомых, а могут находить их на земле и поверхности пещер и растений, т.е. может быть и объемная, и поверхностная реверберация. Размер их жертв по размаху крыльев составляет от 5 мм (двукрылые) до 50 мм (чешуекрылые).

В экспериментальных исследованиях летучих мышей (Eptesicus fuscus) была показана их способность корректировать свои локационные сигналы [1, 2, 3] и локационное маневрирование [1, 4] для борьбы с реверберационной помехой. Охота эхолокационных животных имеет фазы поиска и обнаружения, сближения и захвата добычи. Каждой фазе присущи свои зондирующие сигналы и определенная поведенческая моторика. В фазе поиска летучие мыши излучают мощные широкополосные локационные импульсы, которые повышают шансы на обнаружение добычи. После ее обнаружения и отслеживания ее в фазе приближения (обычно около 500 мс), следует сокращение межимпульсных интервалов (возрастание частоты их повторения) с одновременным уменьшением их амплитуды. Приближаясь к жертве, летучие мыши также сдвигают частоту локационных импульсов в низкочастотную область (20 – 30 кГц), для отстраивания от реверберационного фонового шума. Причем, такой сдвиг по частоте бывает не всегда, а при наличии сильной реверберации или шумовой помехи, без которых этого не происходит. Можно сделать вывод, что в отсутствии помех летучим мышам комфортнее применять широкополосную эхолокацию. Перед захватом добычи характеристика направленности сигнала сужается для фокусировки на эхопотоке от цели. При этом применяется высокоскоростная выборка сенсорного объема и еще больше возрастает частота повторения зондирования. Адаптационная подстройка параметров локационных импульсов происходит часто, но не всегда, в зависимости от уровня шумовой помехи. Гораздо чаще происходит

адаптивное к конкретному месту и условиям локации поведение с постоянными поворотами головы и приближении к цели под малыми углами атаки. Такая тактика позволяет, постоянно зондируя цель, находить оптимальные точки и направления лоцирования с наименьшей помехой.

Эхолокационная адаптация дельфинов

Эхолоцирующим морским животным приходится сталкиваться в морской среде с реверберацией трех видов – объемной, поверхностной и донной, которые имеют свои особенности. Объемная реверберация обычно не значительна, если в воде не присутствуют биологические или другие рассеиватели звука. Поверхностная реверберация возникает из за рассеяния звука нестабильной поверхностью воды и пузырьками воздуха, которыми насыщен приповерхностный слой. Чем более неспокойно море, тем она сильнее. Донная реверберация создается рассеянием и отражением звука твердой, неоднородной и неровной структурой дна. Поверхностная и донная реверберации могут существенно акустически маскировать объекты локации возле поверхности и в придонном слое. При этом, для дельфинов, как и для других китообразных, она не является большой проблемой. Они успешно охотятся, как у поверхности, так и у дна и даже способны находить зарывающуюся в песок рыбу.

Нашей группой был проведен комплекс исследований возможностей дельфинов-афалин (Tursiops truncatus) к адаптации их эхолокационных сигналов и поведения в процессе поиска, обнаружения и идентификации объектов, расположенных в толще воды (1 м от поверхности), возле поверхности (в 0.1 м), на дне и под слоем донных осадков (до 0.1 м) [5, 6, 7, 8]. Эксперименты над животными проводились в свайно-сетевом морском вольере по поведенческой методике с пищевым подкреплением в условиях их свободного плавания. Два дельфина, участвующие в экспериментах поочередно, должны были обнаружить объект (стальной цилиндр высотой и диаметром 120 мм), но и отличить его (идентифицировать) от латунного цилиндра тех же размеров. Нахождение искомого цилиндра на глубине 1 м, в объеме с минимальной реверберацией, не представляло сложностей животным и в этой ситуации они лоцировали мишень комфортными для себя короткими импульсами 10-12 мкс с широкополосным спектром до 140-170 кГц. При поиске цели в приповерхностном слое воды происходит подстройка локационных сигналов к более сильной реверберации. Локация обычными широкополосными короткими импульсами в процессе поиска к моменту обнаружения, когда требовалась идентификация объекта, начинала меняться. Происходило сужение спектра сигнала до его верхней границы на 40-60 кГц, увеличение

длительности импульсов до 45 мкс и их амплитуды [5]. Аналогичная адаптация сигналов была и при поиске объекта в придонной области. Сначала также поиск начинался посредством лоцирования широкополосными короткими импульсами, после неуверенного обнаружения спектр сигналов сдвигался в область низких и средних частот ниже 100 кГц и энергетическим максимумом в районе 50 кГц с возрастанием длительности импульса до 15 мкс. При еще более сложной задаче – поиске мишени под слоем морских осадков (песчано каменистый грунт, глубина 0.1 м) применялись зондирующие сигналы с еще более низкочастотным спектром с верхней границей у 80 кГц, максимумом на 20 кГц и длительностью в 17-20 мкс. Амплитуда сигнала при этом возрастала в четыре раза по сравнению с поиском в толще воды и в полтора раза по сравнению с поиском мишени на дне [6]. В этих условиях рост энергии необходим для компенсации ослабления импульсов при их отражении от границ сред вода-дно и обратно, а также рассеянии неровностями дна.

Параллельно с адаптацией локационных сигналов по частоте, длительности и энергии при различении заиленной мишени проходила адаптация стратегии поиска и траектории движения. Движение менялось с линейного в процессе поиска до неуверенного обнаружения на круговое над обнаруженной целью, с постепенным приближением к ней по конической спирали с вершиной в точке цели.[7, 8]. Движение по такой траектории давало возможность, не теряя акустического контакта с объектом продолжительно (от полминуты до минуты) проводить зондирование и принимать решение, что именно обнаружено. Кроме этого, приближаясь постепенно к цели под разными углами, выбирались оптимальные места и углы локации путем их постоянного перебора, что позволяло собирать максимальную информацию, необходимую для ее уверенной идентификации. Перебор разных углов локации необходим из за волнообразного эффекта рассеяния зондирований дна с различными углами наклона характеристики направленности сигнала к поверхности дна. Этот перебор позволял выбрать угол локации с минимальной помехой рассеяния импульса.

Заключение

Совершенные биосонары таких разных животных, как летучие мыши и китообразные, обитающие в наземной и водной среде, похожим и оптимальным способом решают задачу борьбы с реверберацией и поиска цели в сложных акустических условиях. Их возможности и принцип действия весьма интересны для изучения и бионического примера при создании технических аналогов [9].

Работа поддержана федер. бюджетом по госзаданию на 2026 г. (№ 075-00264-26-00).

Список литературы:

1. *B. Mao, M. Aytekin, G.S. Wilkinsen, C.F. Moss* Big brown bats (Eptesicus fuscus) reveal diverse strategies for sonar target tracking in clutter // J. Acoust. Soc. Am. 2016. 140(3). 1839. DOI: 10.1121/1.4962496.
2. *L. Stidsholt, S. Greif, H.R. Goerlitz, K. Beedholm, J. Macaulay, M. Johnson, P. T. Madsen* Hunting bats adjust their echolocation to receive weak prey echoes for clutter reduction // Science Advances.2021. 7(10). 1367. DOI: 10.1126/sciadv.abf1367.
3. *M.G.T. Wikinson, Xing Yao York Wang, N. J. Cowan, C.F. Moss* Echolocating bats adjast sonar call features and head/ear position as they track moving targets in the presence of clutter // J. Acoust. Soc. Am. 2025. 157(3): 2236-2247. DOI: 10.1121/10.0036252.
4. *M. Taub, Y. Yovel* Segregation signal from noise through movement in echolocating bats // Scientific targets in the presence of clutter // J. Acoust. Soc. Am. 2025. 157(3): 2236-2247. DOI: 10.1121/10.0036252.Reports 2020. 10. 382.
5 *Zaitseva K.A., Korolev V.I., Akhi A.V., Krivchenko A.I., Butyrskiy E.Yu.* Probability of underwater target detection in the bottlenose dolphin (Tursiops truncatus) depending on target spatial coordinates./ J. Evol. Biochem. Physiol. 2018. 54(2). DOI: 10 1134/S0022093018020084.
6 *Zaitseva K.A., Korolev V.I., Krivchenko A.I., Akhi A.V., Butyrskiy E.Yu.* Dolphins (Tursiops truncatus) are able to pursefully change the spectral and temporal parameters of echolocation signals / J. Evol. Biochem. Physiol. 2019. 55(3). 211-214. DOI: 10 1134/S0022093019030098.
7 *Zaitseva K.A., Korolev V.I., AkhiA.V., Butyrskiy E.Yu.* Detection of targets masked by marine sediments in dolphins Tursiops truncatus./ J. Evol. Biochem. Physiol. 2020. 56(6). 76-81. DOI: 10.31857/S004445292006011X.
8 *Zaitseva K.A., KorolevV.I., Akhi A.V., Akhi A.A.* Adaptation of dolphins (Tursiops truncatus) location signals when searching for identifying objects hidden by sea sediments./ Bioacoustics. 2021. 31(5). 535-544. DOI: 10. 1080/09524622.2021.1994467
9 *C.A. Diebold, A. Sales, C.F. Moss* Adaptive Echolocation and Flight Behaviors in Bats Can Inspire Technology Innovations for Sonar Tracking and Interpretation // Sensora 2020. 20(10). 2958. DOI: 10.3390/s20102958.

УДК: 534.4, 534–143, 57.084.1. DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39725

Имитация звуковых сигналов ларг Phoca Largha, содержащихся в Приморском океанариуме

С.В. Горовой[1,2,a], И. О. Катин[3,b]

[1]*Дальневосточный федеральный университет. 690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10.*

[2]*Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН.*

690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43.

[3]*Национальный научный центр морской биологии им. А.В. Жирмунского ДВО РАН.*

690041 г. Владивосток. ул. Пальчевского, д. 17.

E-mail: [a]GorovoySV@mail.ru, [b]katinpelis@gmail.com

Ранее было показано, что звуковые сигналы ларг *Phoca largha,* обитающих в прибрежных акваториях дальневосточного побережья России, воспринимаемые на слух как рычания, завывания, крики и др., представляют собой амплитудно-модулированные последовательности близких по форме импульсов длительностью до единиц миллисекунд, следующих через регулярные интервалы времени. В докладе описаны результаты формирования и имитации в воздушной среде записанных ранее звуковых сигналов ларг *Phoca largha*, содержащихся в открытых плавучих вольерах Приморского океанариума в б. Парис, о. Русский залива Петра Великого Японского моря. Для формирования сигналов использовались программно–реализованные цифровые фильтры с конечными импульсными характеристиками (КИХ фильтры), возбуждаемые последовательностями коротких импульсов. Импульсные характеристики использованных фильтров повторяли форму вышеуказанных импульсов. Амплитуды импульсов и длительности пауз между ними регулировались так, чтобы получались сигналы, похожие, при восприятии на слух, на сигналы, издаваемым ларгами в различных ситуациях. Для излучения сформированных сигналов использовались широкополосные громкоговорители.

Ключевые слова: ларга *Phoca largha*, морские млекопитающие, звуковые сигналы морских млекопитающих

Imitation of Phoca Largha beeps, kept in the Primorsky Oceanarium

S.V. Gorovoy[1,2,a], I.O. Katin[3,b]

[1]Far Eastern Federal University. Campus 10 Ajax Bay, Russky Island, Vladivostok 690922 Russia.

[2]V.I. Ilyichev Pacific Oceanological Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences. Russia, Primorsky Kray 690041, Vladivostok, Baltiyskaya 43.

[3] Zhirmunsky National Scientific Center for Marine Biology of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences. Russia, Primorsky Kray 690041 Vladivostok, Palchevskogo 17.

E-mail: [a]GorovoySV@mail.ru, [b]katinpelis@gmail.com

Earlier it was shown that the sound signals of *Phoca largha*, living in coastal areas of the Far Eastern coast of Russia, perceived by ear as growls, howls, screams, etc., are amplitude-modulated sequences of similar pulses lasting up to a few milliseconds, following at regular intervals. The report describes the results of the formation and imitation in the air of previously recorded sound signals of *Phoca largha* largha, kept in open floating enclosures of the Primorsky Oceanarium in Paris Bay, Russky Bay of Peter the Great of the Sea of Japan. To generate signals, software-implemented digital filters with finite impulse characteristics (FIR filters) excited by short pulse sequences were used. The impulse characteristics of the filters used repeated the shape of the above pulses. The amplitudes of the pulses and the duration of the pauses between them were adjusted so that signals were obtained that were similar to the signals emitted by the seals in different situations. Wideband loudspeakers were used to emit the generated signals.

Keywords: Phoca largha, marine mammals, sound signals of marine mammals

PACS: 43.60

Введение

Пятнистые нерпы – ларги *Phoca largha* обитают на большей части восточного побережья России, от Чукотского моря на севере до Японского моря на юге. В районе о. Сахалин, на побережье залива Петра Великого Японского моря, и на островах, входящих в состав территории Дальневосточного морского заповедника России, находятся крупные лежки этих животных, на которых могут одновременно находиться, ввиду обилия пищи, сотни, а иногда и тысячи особей. Основной пищей ларг является рыба: мойва, корюшка, навага, камбала, а также лососевые (кета, горбуша и др.). В ряде случае группы ларг из 10 – 100 и более особей «добывают» рыбу, в том числе лососей, из ставных неводов, устанавливаемых вблизи берега рыбопромысловыми предприятиями, или «не пропускают» в реки идущую в них из моря на нерест рыбу. Это приводит к снижению эффективности рыболовства и неоднозначному отношению к ларгам со стороны рыбаков. Проблема отвода

или отпугивания ларг от орудий лова актуальна не только для России, но и для Китая, Кореи, Японии и др. стран. Одним из предлагаемых рядом исследователей способов решения этой проблемы является подача световых и звуковых сигналов, которые должны быть «правильно поняты» ларгам. Такие сигналы встречаются в природе: вспышки молнии, раскаты грома, инфразвуковые предвестники штормов, шум дождя и др., но энергетические затраты, необходимые для их имитации, слишком высоки.

К менее энергетически затратным и практически реализуемым могут относиться звуковые сигналы, похожие на сигналы, издаваемые ларгами в различных ситуациях (спаривание, опасность, добывание пищи и др.), т.е. сигналы из их «акустического репертуара» [1], но и эффективность воздействия таких сигналов на поведение животных соответственно ниже. Кроме того, воздействие звуковых сигналов должно сопровождаться т.н. «подкреплением» (положительным или отрицательным), без которого у животных сформируется привыкание к этим сигналам и они перестанут на них реагировать. Воспроизведение или имитация теми или иными способами звуковых сигналов, издаваемых ларгами в различных ситуациях, рассматривается рядом авторов не только как один из способов отвлечения, отпугивания их от орудий рыболовства, а также установленных в водной среде или на берегу предметов, но и для дистанционной подачи содержащимся в неволе заранее подготовленным (тренированным) ларгам команд для выполнения заданных действий на берегу или под водой.

Имитация звуковых сигналов ларг

Некоторые результаты выполненных в Приморском океанариуме, г. Владивосток, о. Русский, исследований издаваемых ларгами в воздухе звуков приведены в [2, 3]. Показано, что данные звуки образуются в результате формирования ларгами последовательностей близких по форме амплитудно–модулированных импульсов длительностью 2 – 5 мс, период повторения которых изменяется со временем и составляет, в различных ситуациях, 10 – 25 мс [2]. Это воспринимается на слух, по аналогии с голосам людей, как высокий голос, низкий голос, изменение высоты и громкости голоса.

В качестве примера, (подробнее см. [2]) на рис. 1 показаны: а – осциллограмма трех последовательных звуков, напоминающих «аррр» разной длительности, которые издавала в воздухе ларга Варя (масштабы уровней условные), б – спектрограмма данных звуков, в – растянутая по времени осциллограмма наиболее продолжительного (4.5 с) из указанных звуков, из которой видно, что данный звук представляет собой последовательность коротких импульсов, г – осциллограмма трех таких импульсов из указанной последовательности, следующих ориентировочно через 20 мс и близких по форме. Подобные результаты были

получены для всех 5 особей ларг, содержащихся в открытых вольерах Приморского океанариума (3 самца и 2 самки), рис. 2.

Механизм создания звуков ларгами не до конца понятен, однозначно соотнести полученные результаты с анатомическими особенностями ларг в настоящее время не представляется возможным. Формы импульсов и параметры модуляции у различных особей «слегка» различаются [2, 3], но тренеры, работающие с ларгами, различают их «голоса».

В качестве аналитических моделей показанных на рис. 1г импульсов в начальном приближении были использованы фрагменты затухающих синусоид, содержащих 3–4 периода с двумя «перескоками» фазы. В промежутках между импульсами наблюдаются фрагменты колебаний с частотой 1 – 3 кГц, их «важность» при моделировании голосов ларг необходимо уточнить.

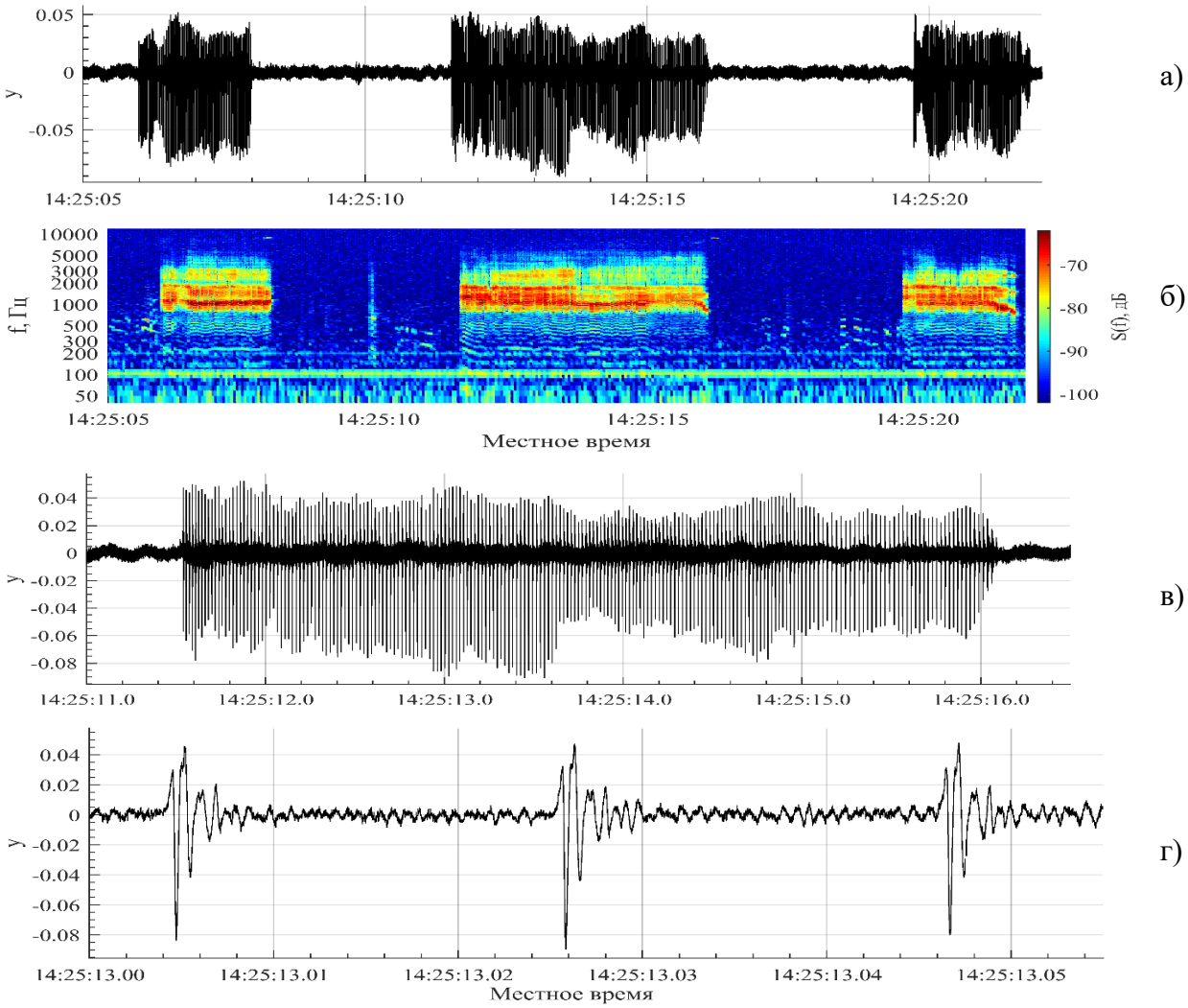


Рис.1. Ларга Варя. Осциллограммы и спектрограмма звуков, напоминающих «аррр»

Для более точного формирования последовательностей импульсных сигналов, близких при восприятии на слух к сигналам ларг, рис. 1, был использован известный метод синтеза сигналов заданной формы с помощью цифрового фильтра с конечной импульсной

характеристикой (КИХ фильтра) [4], к выходу которого подключен фильтр нижних частот (ФНЧ). Упрощенная схема такого устройства, реализованного авторами, показана на рис. 2. Прямоугольниками с буквой T обозначены элементы задержки на T секунд, где $T = 1/f_s$, f_s – частота дискретизации имитируемого сигнала, N – количество используемых отсчетов данного сигнала, треугольниками обозначены усилители с коэффициентами усиления A0, A1, A2, …,. AN, знаком суммы в кружке обозначен N+1 – канальный сумматор, прямоугольник с надписью ФНЧ – фильтр нижних частот. Все элементы данной схемы реализованы программно.



Рис. 2. Приморский океанариум. Ларги во время выполнения одного из экспериментов

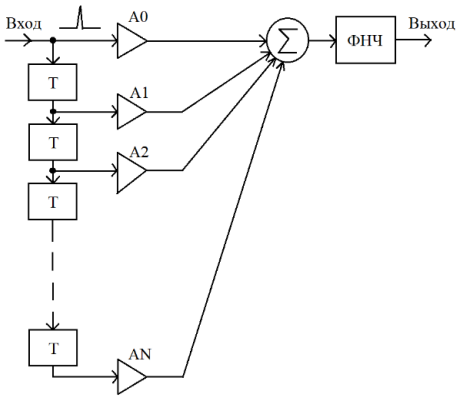


Рис. 3. Схема формирования сигналов, имитирующих издаваемые ларгами звуки

Процесс формирования сигнала, имитирующего заданный сигнал из вокального репертуара исследуемой особи заключается в следующем. Выбирается один из импульсов, формирующих последовательность, рис. 1в таких как на рис. 1г, который в дальнейшем будет использоваться как базовый для данной особи, и повторяться столько раз, сколько импульсов содержится в моделируемой последовательности, например показанной на рис. 1в. Обозначим его s(t) и будем считать, что он начинается в момент t = 0 и заканчивается в момент $N*T=N/f_s$. Результат дискретизации по времени данного сигнала запишем в виде:

$$A0=s(0),\ A1=s(T),\ A2=s(2T),\ \dots\ AN=s(NT). \qquad (1)$$

Выберем численные значения коэффициентов усиления на схеме, рис. 3, так, чтобы они были равны величинам A0, A1, …, AN в (1). Если на вход данной схемы в произвольный момент времени t_0 подать одиночный цифровой δ импульс, определяемый соотношением

$$\delta(t_0 + t) = \begin{cases} 0 \text{ при } t \neq t_0, \\ 1 \text{ при } t = t_0, \end{cases}$$

то сигнал на выходе сумматора будет повторять результат дискретизации базового сигнала s(t), а сигнал на выходе ФНЧ будет повторять частотно–временную структуру данного базового сигнала. Последовательно повторяя подачу на вход схемы, рис. 3, одиночных цифровых импульсов в соответствии с частотой следования базовых импульсов

(ориентировочно 20–30 мс), получим на выходе ФНЧ модель имитируемого сигнала, но с одинаковыми амплитудами. Для формирования амплитудных огибающих, таких как на рис. 1в, использовано соответствующее техническое решение. Максимальные значения взаимных корреляционных функций имитируемых и имитирующих сигналов, после формирования огибающих, составляли более 0.85.

Апробация описанного способа формирования сигналов подтвердила его пригодность для создания сигналов, которые имитируют сигналы из вокального репертуара белух.

Предположительно, данный способ пригоден не только для имитации заданных сигналов, но и для формирования других сигналов, в том числе и тех, которые вызывают у ларг те или иные ощущения.

Заключение

Имитационные сигналы, созданные описанным в работе методом, в дальнейшем предполагается использовать в качестве инструмента для исследования поведения ларг.

Предполагается, что полученные результаты в той или иной степени применимы и к другим представителям семейства *Phoca largha*, в том числе и обитающим в естественных условиях.

Авторы благодарят руководство и тренерский коллектив Вольерного комплекса Приморского океанариума за подготовку ларг и помощь при проведении экспериментов.

Работа частично выполнена в рамках НИР «Разработка методологии исследования сложных акустических систем и сред» ТОИ ДВО РАН, регистрационный номер: 124022100075-6.

Список литературы

1. Sills, J.M., Reichmuth C. Vocal Behavior in Spotted Seals (Phoca largha) and Implications for Passive Acoustic Monitoring. Frontiers in Remote Sensing | www.frontiersin.org 2022, **3**, Article 868435.
2. *Горовой С.В., Катин И.О.* Предварительные результаты исследования акустического репертуара ларг Phoca largha, полученные в Приморском океанариуме // Сборник трудов XXXVII сессии Российского акустического общества. М.: ГЕОС. 2025. С. 924.
3. *Горовой С.В., Катин И.О.* Предварительные результаты исследования акустического репертуара ларг Phoca largha, полученные в Приморском океанариуме // Акустический журнал, 2025, **71**, № 5. С. 75.
4. *Оппенгейм А., Шафер Р.* Цифровая обработка сигналов. Техносфера. М., 2006.

УДК: 551.46.06 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39726

Программно-аппаратный комплекс для исследования водной фауны

Н.Я. Кондрашов[1,a], А.В. Ганциевский[1,b], И.Б. Старченко[1,c], Е.М. Ганущак[1,d], Н.М.Кордуманов[1,e]

[1] *Донской государственный технический университет, Политехнический институт (филиал) в г. Таганроге. 347904, Таганрог, Россия.*

E-mail: [a] kit.kondor@gmail.com, [b] agancievskii@donstu.ru, [c] istarchenko@donstu.ru, [d] ekaterina.gun22@gmail.com, [e] yahafner1980@gmail.com

Аннотация: Программно-аппаратный комплекс для исследования водной фауны нацелен на сбор статистики о видовом и количественном составе рыбной фауны в водных объектах (реках, озёрах). Этот комплекс включает в себя гидроакустический буй, оснащённый двумя многолучевыми эхолотами и подводными камерами. Встроенный компьютер на базе Raspberry Pi 4 обрабатывает собранную информацию о количестве и виде рыбы, после чего данные передаются через сеть акустических модемов/беспроводную связь на удаленный внешний компьютер. Далее, эта информация загружается в облачное хранилище и становится доступной пользователям через веб-браузер. Основной целью является интеграция разработанного решения в структуры Федерального агентства по рыболовству, научно-исследовательские институты и частные рыбные хозяйства. Особенность работы будет являться интеллектуальная система распознавания образов видов рыб. Ожидаемыми результатами проекта являются надежная статистика о состоянии рыбных ресурсов и их изменениях, сохраняемая на облачном сервере и доступная через веб-браузер и мобильное приложение. Потенциальные потребительские сегменты включают в себя организации, занимающиеся управлением рыбными ресурсами, научные исследователи и рыбные хозяйства, которые могут использовать полученные данные для принятия решений и мониторинга состояния рыбных запасов.

Ключевые слова: гидроакустический буй, подводная связь, искусственный интеллект, облачное хранение и обработка, алгоритмы распознавания

Hardware-software complex for study of aquatic fauna

N.Ya. Kondrashov[1,a], A.V. Gantsievsky[1,b], I.B. Starchenko[1,c], E.M. Ganushchak[1,d], N.M.Kordumanov[1,e]

[1] *Don State Technical University, Polytechnic Institute (branch). Taganrog, 347904, Russia.*

E-mail: [a] *kit.kondor@gmail.com*, [b] *agancievskii@donstu.ru*, [c] *istarchenko@donstu.ru*, [d] *ekaterina.gun22@gmail.com*, [e] *yahafner1980@gmail.com*

Abstract: The software and hardware complex for the study of aquatic fauna is aimed at collecting statistics on the species and quantitative composition of fish fauna in water bodies (rivers, lakes). This complex includes a sonar buoy equipped with two multipath echo sounders and underwater cameras. An integrated Raspberry Pi 4-based computer processes the collected information about the number and type of fish, after which the data is transmitted via a network of acoustic modems/wireless communication to a remote external computer. Next, this information is uploaded to the cloud storage and made available to users via a web browser. The main goal is to integrate the developed solution into the structures of the Federal Agency for Fisheries, research institutes and private fisheries. A special feature of the work will be an intelligent image recognition system for fish species. The expected results of the project are reliable statistics on the state of fish resources and their changes, stored on a cloud server and accessible via a web browser and mobile application. Potential consumer segments include organizations involved in the management of fish resources, scientific researchers and fisheries, which can use the data obtained to make decisions and monitor the state of fish stocks.

Keywords: sonar buoy, underwater communication, artificial intelligence, cloud storage and processing, recognition algorithms

PACS: 43.30, 43.60

1 Введение

Одной из самых серьезных проблем, с которыми сталкивается человечество, это контроль водной фауны, так как с годами происходят разнообразные изменения экосистемы, к примеру загрязнение водной среды или уменьшение популяции рыбы [1]. Для контроля экосистемы используются разнообразные устройства, например, активная акустика - гидролокаторы и эхолоты, которые помогают в изучении подводной среды.

Одной из главных проблем является контроль популяций рыбы, так как бесконтрольный вылов рыбы, приводит к исчезновению некоторых видов [2, 3]. Если взять традиционные методы, такие как ручной подсчет, не только требуют значительных затрат времени и

рабочей силы, но и подвержены большим погрешностям, вызывают стресс у рыб и приводят к неточным данным. Для решения этой проблемы, предлагается использование нейронных сетей и компьютерного зрения.

Прогресс в области робототехники, интернета вещей, искусственного интеллекта, и особенно компьютерного зрения, открывает новую эпоху анализа водной фауны. Предлагается разработка умного буя для исследования водной фауны. Эффективность автоматизированного мониторинга водных биоресурсов существенно возрастает при комплексном использовании видеопотока, обрабатываемого нейросетью, и данных, получаемых с гидрохимических и акустических датчиков [4, 5]. В рамках разрабатываемого программно-аппаратного комплекса его центральная часть – умный буй – выступает не только как платформа для крепления акустических датчиков и подводной камеры, но и как многосенсорный узел сбора данных [6]. Использование акустической информации (сила цели) [7] совместно с возможностями нейросетей, в данном случае модели YOLO [8], открывает путь к автоматическому и точному мониторингу рыб в реальном времени [9]. Благодаря высокой скорости и способности работать напрямую с видеопотоком с буев, YOLO может кардинально изменить контроль за популяциями.

Однако для эффективной работы системы нужно решить ряд технических вызовов:

- Подготовка данных: требуется качественное обучение модели на репрезентативных выборках.
- Сложные условия: алгоритм должен стабильно работать при плохой видимости (мутности), переменном освещении и в ситуациях, когда рыбы перекрывают друг друга из-за высокой плотности.
- Биоразнообразие: необходимо учитывать различия в размерах и видах особей внутри одной экосистемы.

2 Описание архитектуры системы

Разрабатываемый программно-аппаратный комплекс представляет собой распределённую систему сбора, обработки и анализа данных о состоянии водных биоресурсов, центральным элементом которой является автономный гидроакустический буй. Вся архитектура может быть разделена на четыре логически связанных уровня, каждый из которых выполняет строго определённые функции и взаимодействует с соседними посредством проводных или беспроводных каналов связи (рис. 1).

Первый уровень — это гидроакустический буй, выступающий платформой для размещения всех датчиков и вычислительных модулей. На буе установлены два многолучевых эхолота, подводная камера высокого разрешения и набор гидрохимических датчиков. Все эти

устройства подключены к встроенному компьютеру Raspberry Pi 4, который выполняет функции бортового вычислительного ядра [10].

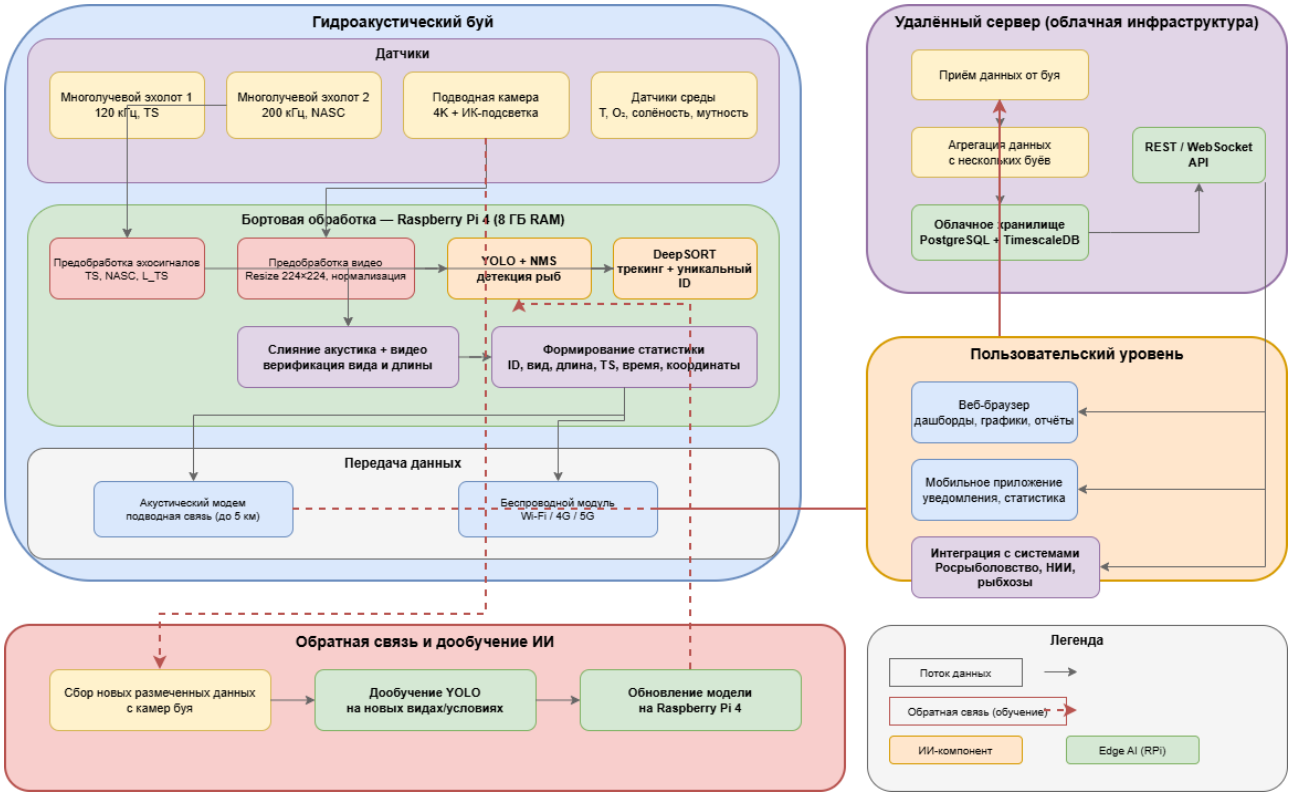


Рис. 1. Архитектура программно-аппаратного комплекса «Умный буй»

Второй уровень отвечает за первичную обработку данных непосредственно на буе. Raspberry Pi 4 принимает эхосигналы от гидролокаторов, вычисляя силу цели каждой рыбы, её длину на основе акустической модели, а также оценивая плотность скоплений через показатель NASC. Параллельно видеопоток с камеры проходит предобработку, после чего нейросетевая модель YOLO выполняет детекцию рыб, а алгоритм DeepSORT присваивает каждой особи уникальный идентификатор для отслеживания между кадрами. Затем система сливает акустические и визуальные данные: сопоставляет рыбу с её эхосигналом, сравнивает оценки длины и подтверждает видовую принадлежность, формируя структурированную запись о каждой обнаруженной особи.

Третий уровень обеспечивает передачу данных от буя к удалённой инфраструктуре. Для этого предусмотрены два резервирующих канала: беспроводной модуль для связи на поверхности и акустический модем для подводной передачи на расстояние до пяти километров. Сформированные на буе пакеты данных отправляются на удалённый внешний компьютер, выступающий центральным сервером сбора информации.

Четвёртый уровень представляет собой облачную серверную инфраструктуру и интерфейсы доступа для конечных пользователей. Удалённый компьютер принимает данные от всех буёв, выполняет их агрегацию и запись в базу данных. Поверх базы данных развёрнут

программный интерфейс приложений, который обеспечивает стандартизированный доступ к хранящимся данным. На основе этого интерфейса построены два пользовательских приложения: веб-браузер для доступа к интерактивным дашбордам и мобильное приложение для оперативного мониторинга. Дополнительно архитектура включает контур обратной связи, в котором видеоматериалы с буёв используются для дообучения модели YOLO, после чего обновлённые веса нейронной сети загружаются обратно на Raspberry Pi 4.

Особую роль в архитектуре играет контур обратной связи, который обеспечивает непрерывное совершенствование системы искусственного интеллекта. Видеоматериалы, собранные подводными камерами буёв, периодически выгружаются на сервер и проходят процедуру дополнительной разметки, позволяющей выявлять новые или редко встречающиеся виды рыб, а также фиксировать нестандартные условия наблюдения, такие как сильная мутность воды или необычное поведение объектов. Эти вновь размеченные данные используются для дообучения модели YOLO, после чего обновлённые веса нейронной сети загружаются обратно на каждый буй, заменяя предыдущую версию. Благодаря такому циклу система постепенно повышает точность распознавания видов и адаптируется к конкретным условиям водоёма, где она эксплуатируется.

3 Процесс обучения модели

Процесс обучения модели YOLO осуществлялся на платформе Google Colab с использованием графического ускорителя, что позволило максимально эффективно использовать вычислительные ресурсы для оптимизации производительности модели. Для эксперимента был взят «Крупномасштабный набор данных для сегментации и классификации». Набор данных включает изображения морского леща, красного морского леща, морского окуня, кефали, ставриды, черного морского шпрота, полосатой кефали, форели и креветок, более 18000 изображений. Модель обучается на обработанных обучающих данных, а проверка выполняется на валидационном наборе данных в течение 20 эпох. Отчет о классификации после тестирования модели машинного обучения показал, что точность составляет 99%.

В рамках этого проекта была разработана высокоточную модель глубокого обучения для классификации 9 различных видов рыб с использованием изображений. Благодаря тщательной предварительной обработке и стратегиям обратного вызова достигли следующих результатов: точность на тестовом наборе данных: 99,1%

Сбалансированная производительность по всем классам с минимальным количеством ошибок в матрице ошибок. Эти результаты показывают, что модель отлично обобщается на ранее не встречавшиеся данные и подходит для практического применения для визуального анализа популяции рыбы.

Заключение

Таким образом, архитектура комплекса охватывает полный цикл обработки информации: от физического измерения параметров среды и биологических объектов на буе через периферийный искусственный интеллект и резервируемую передачу данных до облачного хранения, визуализации и непрерывного самообучения. Конечными потребителями этой информации выступают Федеральное агентство по рыболовству, использующее данные для установления квот вылова, научно-исследовательские институты, изучающие динамику популяций, и частные рыбные хозяйства, которым система позволяет эффективно управлять своими водоёмами.

Список литературы

1. *Jan A., Shah T. H., Nissa N. U.* Impact of aquatic pollution on fish fauna // Bact. Fish Dis. Academic Press, 2022. P. 103-112.
2. *Шевченко М. С., Овчинникова Т. М.* Современные способы мечения в рыбоводстве // Горинские чтения. Инновационные решения для АПК: Материалы Международной студенческой научной конференции, Майский, 29-30 марта 2022 года. 2022. С. 78.
3. *Байталюк А. А., Радченко В. И., Старовойтов А. Н.* Надлежащее управление рыболовством как залог обеспечения устойчивого состояния рыбных запасов / /Вопр. рыбол. 2026. **27**. №1. С. 107-122.
4. *Amirpour H., Ghanbari M., Timmerer C.* DeepStream: Video streaming enhancements using compressed deep neural networks // IEEE Trans. Circuits Sys. Video Tech. 2022. **35**. №4. P. 3786-3797.
5. *Narsina D. et al.* Neural Network Architectures for Real-Time Image and Video Processing Applications // Eng. Intern. 2022. **10**. №2. P. 131-144.
6. *Fortuna S. et al.* Design Concept of an Innovative Smart Buoy for Marine Environment Monitoring // International Joint Conference on Mechanics, Design Engineering & Advanced Manufacturing. Cham : Springer Nature Switzerland, 2024. P. 455-463.
7. *Кузнецов М. Ю. и др.* Технология учёта численности рыб в садках рыбоводческих хозяйств с использованием гидроакустических и программных средств //Труды ВНИРО. 2024. **197**. С. 79-90.
8. *Vijayakumar A., Vairavasundaram S.* Yolo-based object detection models: A review and its applications // Multim. Tools App. 2024. **83**. №35. P. 83535-83574.
9. *Yang Y. et al.* A real-time underwater acoustic telemetry receiver with edge computing for studying fish behavior and environmental sensing // IEEE IoT J. 2022. **9**. №18. p. 17821-17831.
10. Raspberry Pi 4 Model B: подключение, настройка и начало работы // URL: https://wiki.amperka.ru/products:raspberry-pi-4-model-b (дата обращения: 06.04.2026).

УДК 594.124+57.043+534-143 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39727

Влияние низкочастотного шума на поведение беломорских мидий *Mytilus edulis* L.

П.А. Лезин[1,a], **В.В. Халаман**[1,b], **А.К. Британков**[2,c], **Д.А. Касьянов**[2,d]

[1] *Зоологический институт РАН. Санкт-Петербург, 199034, Университетская наб., 1.*

[2] *Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова Грехова РАН. Нижний Новгород, 603951, ул. Ульянова, 46.*

E-mail: [a]Peter.Lezin@zin.ru, [b]Vyacheslav.Khalaman@zin.ru, [c] britenkov@ipfran.ru, [d] da_kasya-nov@ipfran.ru

Аннотация. Представлены предварительные результаты лабораторных экспериментов по оценке влияния низкочастотного акустического воздействия на поведение двустворчатого моллюска *Mytilus edulis* L. Исследования проводились в аквариальных условиях. Акустическое воздействие на моллюсков осуществляли при помощи вибрационного излучателя сигнала. Оценка скорости формирования биссусных нитей и динамики движения створок показала, что даже кратковременное воздействие низкочастотного сигнала приводит к статистически значимому поведенческому ответу, характер которого зависит от уровня звукового давления и индивидуальных особенностей моллюсков. Полученные результаты указывают на высокую чувствительность *Mytilus edulis* L. к низкочастотным шумам и подтверждают необходимость дальнейших исследований.

Ключевые слова: мидия, *Mytilus edulis*, антропогенные шумы, поведение, биссус, акустика

The effect of low-frequency noise on the behavior of White Sea mussels *Mytilus edulis* L.

P.A. Lezin[1,a], **V.V. Khalaman**[1,b], **A.K. Britenkov**[2,c], **D.A. Kas'yanov** [2,d]

[1] *Zoological institute of the Russian Academy of Sciences. Saint-Petersburg 199034, Russia.*

[2] *Federal Research Center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences (IAP RAS). Nizhny Novgorod 603951, Russia.*

E-mail: [a]Peter.Lezin@zin.ru, [b]Vyacheslav.Khalaman@zin.ru, [c]britenkov@ipfran.ru, [d] da_kasya-nov@ipfran.ru

Abstract. The report presents preliminary results of laboratory experiments to evaluate the effect of low-frequency acoustic exposure on the behavior of the bivalve mollusk *Mytilus edulis* L. The

studies were performed in aquarium conditions: we used a vibrating signal emitter to expose the mollusks to acoustic influence. Based on the assessment of the rate of byssus thread formation and the dynamics of valve gaping, it was found that even short-term exposure to a low-frequency signal leads to a statistically significant behavioral response. The nature of the response depends on the sound pressure level and individual characteristics of the mussels. Obtained results indicate that *Mytilus edulis* L. is highly sensitive to low-frequency noise and confirm the need for further research.
Keywords: mussel, *Mytilus edulis*, anthropogenic noise, behavior, byssus, acoustic
PACS: 43.80.Nd, 07.64.+z, 43.30.+m

1 Введение

В последние десятилетия исследования влияния антропогенного шума на морскую биоту является одним из активно развивающихся направлений морской биологии [1]. Возрастающий интерес к проблеме шумового загрязнения связан, прежде всего, с увеличением интенсивности судоходства, а также с развитием добычи полезных ископаемых на морском шельфе [2]. Несмотря на значительное количество работ, посвящённых этому вопросу, влияние низкочастотных шумов на морских беспозвоночных остаётся недостаточно изученным [3]. Особый интерес представляет оценка результатов воздействия антропогенного шума на экосистемы северных морей России, где в последние годы наблюдается активное развитие судоходства и нефтегазодобычи. Двустворчатые моллюски мидии имеют не только известное коммерческое значение, но также являются одним из массовых и важных компонентов биоты северных морей [4]. Поэтому целью настоящей работы было отработать методику экспериментальных исследований влияния звука на морских двустворчатых моллюсков и получить предварительные оценки низкочастотного акустического воздействия на поведение мидий *Mytilus edulis* L. Белого моря.

2 Постановка эксперимента

Работа выполнена на Беломорской биологической станции Зоологического института РАН (Кандалакшский залив Белого моря) в октябре 2025 г. Объектом исследования послужили молодые мидии *Mytilus edulis* L. с длиной раковины 20-25 мм, собранные в акватории биостанции с подвешенных в толще воды искусственных субстратов. Перед началом опытов моллюсков акклимировали в течение двух суток к лабораторным условиям (температура воды $+10^0$C, соленость 24‰). Экспериментальная установка включала опытный и контрольный аквариумы объемом 40 л каждый, а также вибрационный излучатель. В качестве излучателя использовалась электродинамическая головка (вибродинамик) номинальной мощностью 40 Вт, закрепленная внутри полусферы диаметром 100 мм из оргстекла для изоляции динамика от воды и передачи колебаний его диффузора в воду. Излучатель располагался на поверхности в опытном аквариуме таким образом, чтобы большая часть полусферы находилась в воде.

Возбуждение излучателя осуществлялось при помощи усилителя мощности класса D на базе микросхемы TPA3118 BTL 60W, подключенного к выходу осциллографа FNIRSI DSO510, установленного в режим генератора. Согласно расчетам, развиваемый излучателем уровень звукового давления составлял от 80 до 120 дБ относительно 1 мкПа. Поскольку известно, что мидии чувствительны к звукам в диапазоне частот 5-410 Гц [5], в экспериментах использовались гармонические сигналы с частотой 200 Гц, излучаемые на двух уровнях звукового давления – низком (80 дБ) и высоком (110 дБ).

В качестве поведенческих реакций мидий, регистрируемых в ответ на звуковое воздействие, были выбраны два показателя: скорость образования прикрепительных нитей (биссуса) и характеристики движения створок.

Для оценки скорости образования биссуса моллюски помещались в садки с индивидуальными ячейками, установленные в опытном и контрольном аквариумах. Всего в эксперименте было задействовано 100 моллюсков. В начале эксперимента опытная группа в течение 15 минут подвергалась акустическому воздействию, в то время как мидии контрольной группы оставались без такого воздействия. Через 24 часа садки извлекались из воды для подсчета биссусных нитей, сформированные каждой мидией.

Для регистрации и записи движения створок на створках раковин мидий были закреплены датчики Холла и миниатюрные магниты [6]. После установки датчиков мидий помещали в аквариум и выдерживали несколько часов для акклимации. Затем в течение 15-20 мин при помощи регистратора на базе контроллера Arduino записывали движение створок с частотой 1 Гц. После этого, не прерывая записи, на испытуемых моллюсков 10-15 мин воздействовали акустическими сигналами. Общая продолжительность эксперимента составляла 30 мин. Эксперимент проводился в трех повторностях, по 10 особей в каждой. Для анализа динамики абсолютная величина раскрытия створок по каждой особи пересчитана в относительные единицы, выраженные в процентах. Так, за показатель, соответствующий 0 %, принято расстояние между датчиком и магнитом при полностью закрытой раковине, за 100 % принято максимальное раскрытие створок для данной особи. Математическая обработка полученных данных выполнялась стандартными методами линейной статистики. В качестве показателя вариативности приводится 95 % доверительный интервал.

3 Результаты экспериментов

В большинстве случаев у моллюсков наблюдается немедленная реакция на акустический шум в виде полного, либо частичного закрывания створок раковины. Характер движения створок меняется в зависимости от интенсивности акустического сигнала, но у разных мидий наблюдаются свои индивидуальные особенности. В ряде случаев наблюдалась

кратковременная реакция закрывания, при которой происходило резкое смыкание створок с последующим постепенным (в течение нескольких минут) их открытием (рис. 1, *а*).

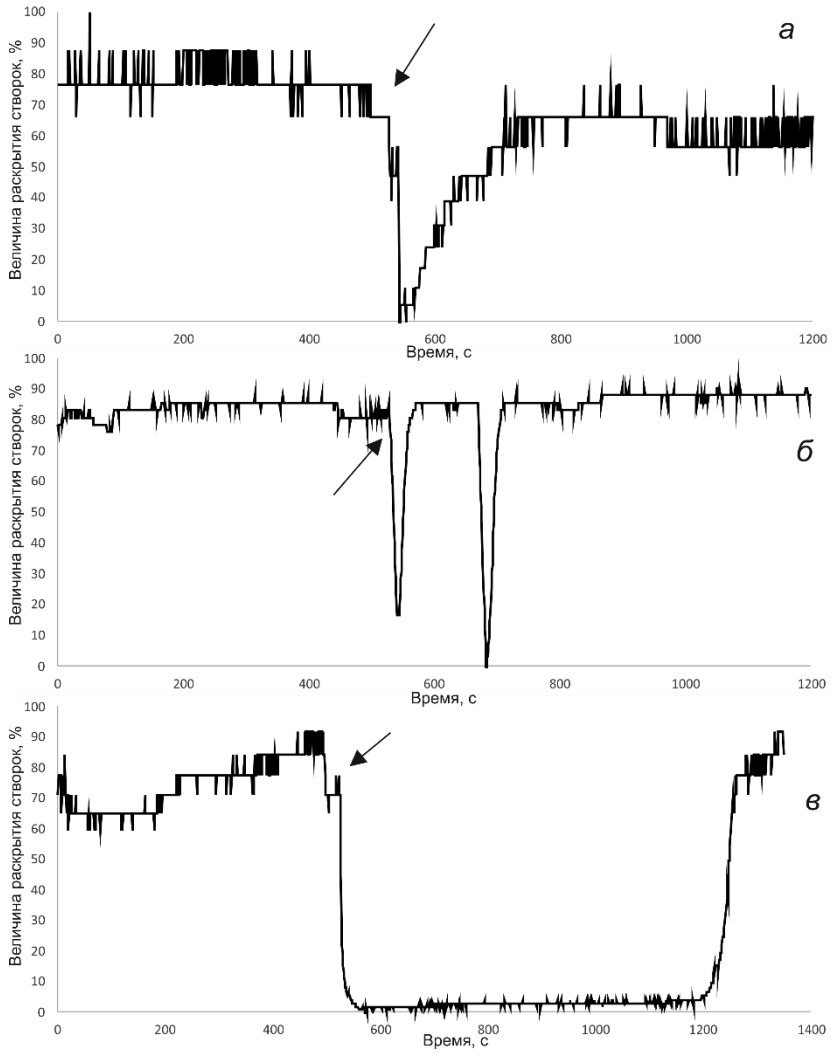


Рис. 1. Примеры динамики движения створок мидий в эксперименте. Стрелкой отмечены моменты включения излучателя.

Характерно, что длительность периода открывания увеличивается с ростом интенсивности акустического воздействия. При низком (около 80 дБ) уровне звукового сигнала наблюдается реакция «хлопанья» – неоднократные циклы закрывания и открытия створок с интервалом в несколько минут (рис. 1, б). При воздействии более интенсивного акустического сигнала (около 110 дБ) у части особей наблюдалась длительная реакция изоляции, сохранявшаяся почти 10 минут и более (рис. 1, *в*). Вместе с тем, реакция некоторых моллюсков на акустическое воздействие оставалась минимальной, когда частота и амплитуда раскрытия створок снижались незначительно, либо изменения динамики движения створок отсутствовали полностью. При максимальном уровне сигнала количество «нечувствительных» особей составило примерно треть от общего числа участвовавших в эксперименте мидий, при низком – не более половины.

Оценка влияния низкочастотного тонального сигнала на скорость формирования биссуса проводилась только при высоком уровне сигнала. Полученные данные показали, что при акустическом воздействии мидии формируют в среднем 5.3 ± 0.8 нити в сутки, тогда как в контрольной группе мидии продуцировали 3.1 ± 0.5 нити. Сравнение средних значений числа нитей по критерию Стьюдента показывает достоверность различий между опытной и контрольной группами (t = 3.94, p <0.05).

3 Обсуждение результатов

Полученные результаты показывают, что мидии немедленно реагируют на искусственное акустическое воздействие. Сходные изменения в амплитуде раскрытия створок и динамики их движения описаны у мидий и других двустворчатых моллюсков в ответ на акустическую стимуляцию [5, 7]. Подобные поведенческие реакции, как правило, интерпретируются как ответ на внешний стресс и могут рассматриваться в качестве интегрального показателя изменений процессов питания, дыхания и экскреции [5]. Аналогичным образом увеличение скорости формирования биссусных нитей служит ответной реакцией на внешние воздействия. Немаловажно, что наблюдаемое в эксперименте усиление продукции биссуса сопоставимо с реакциями мидий на химическое загрязнение и присутствие хищников [8].

В методическом плане для продолжения исследований по изучению влияния звука на беспозвоночных, кроме вопросов инженерного обеспечения, отдельной задачей можно считать регистрацию уровня звукового давления в точке нахождения испытуемой особи.

Заключение

Полученные результаты свидетельствуют о достоверном влиянии низкочастотного шума на поведенческие реакции беломорских мидий и могут быть полезны при составлении рекомендаций по использованию гидроакустических средств. Изменения поведения мидий при наличии акустического раздражителя позволяют сделать вывод о чувствительности беспозвоночных, в частности двустворчатых моллюсков, к шумовому воздействию. Несомненно, для получения более полной картины влияния низкочастотных шумов на морские экосистемы необходимы исследования, направленные на уточнение спектра наиболее чувствительных воздействий и особенностей поведенческих реакций различных гидробионтов. Более того, определение максимально допустимых уровня и продолжительности акустического воздействия на прибрежные экосистемы представляет собой задачу, имеющую важное прикладное значение при современных темпах активного освоения морских и прибрежных арктических и субарктических регионов.

Исследования выполнены в рамках Государственных заданий ЗИН РАН № 125012800889-2 «Структура, биоразнообразие и функционирование экосистем морей

Арктического бассейна в условиях меняющегося климата» и ИПФ РАН FFUF-2024-0041 «Распространение акустических волн в морской среде и верхнем слое земной коры».

Список литературы

1. *Kuşku H., Yiğit M., Ergün S., Yiğit Ü., Taylor N.* Acoustic noise pollution from marine industrial activities: Exposure and impacts. // Aquatic Research. 2018. **1,** N 4. P. 148-161.

2. *Andrew R.K., Howe B.M., Mercer J.A., Dzieciuch M.A.* Ocean ambient sound: Comparing the 1960s with the 1990s for a receiver off the California coast. // Acoustics Research Letters Online. 2002. **3**, N 2. P. 65-70.

3. *de Soto N.A.* Peer-reviewed studies on the effects of anthropogenic noise on marine invertebrates: From scallop larvae to giant squid. // Adv. Exp. Med. Biol. 2016. **875**. P. 17-26.

4. *Buschbaum C., Dittmann S., Hong J.-S., Hwang I.S., Strasser M., Thiel M., Valdivia N., Yoon S.P., Reise K.* Mytilid mussels: global habitat engineers in coastal sediments. // Helgoland Mar. Res. 2009. **63.** P. 47-58.

5. *Roberts L., Cheesman S., Breithaupt T., Elliott M.* Sensitivity of the mussel *Mytilus edulis to* substrate-borne vibration in relation to anthropogenically generated noise. // Mar. Ecol. Prog. Ser. 2015. **538**. P. 185-195.

6. *Comeau L.A., Babarro J.M.F., Longa A., Padin X.A.* Valve-gaping behavior of raft-cultivated mussels in the Ría de Arousa, Spain. // Aquaculture Reports. 2018. **9**. P. 68-73.

7. *Hubert J., Booms E., Witbaard R., Slabbekoorn H.* Responsiveness and habituation to repeated sound exposures and pulse trains in blue mussels. // J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 2022. **547**. P. 151668.

8. *Лезин П.А., Халаман В.В.* Скорость биссусобразования у беломорской мидии *Mytilus edulis* (Linnaeus, 1758) в присутствии метаболитов некоторых гидробионтов. // Биология моря/ 2007. **33**, № 1. С. 62-64.

УДК: 534.7 577

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39728

Реакции нейронов слуховой коры неанестезированной кошки на разнообразные антропогенные звуки

© 2026 г. Н. Г. Бибиков*[1,2], И. Н. Пигарев[2],

[1] *Акустический институт им. акад. Н.Н. Андреева, 117036, г. Москва, Шверника, 4*

[2] *Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН, 127051, г. Москва, Б. Каретный пер., д. 19, стр. 1*

E-mail: (nbibikov1@yandex.ru)

Исследовались реакции нейронов, расположенных в первичной слуховой зоне коры неанестезированной кошки, на обычные звуки, издаваемые людьми, как при повседневном общении, так и при особых обстоятельствах. Эти звуки включали разговоры, стихотворные и музыкальные отрывки, ночные храпы и некоторые иные сигналы. Их длительность обычно составляла несколько десятков секунд, а средний уровень звукового давления составлял 60-80 дБ УЗД. Подробно проанализированы реакции клеток расположенных в высокочастотной зоне первичной слуховой коры на один музыкальный отрывок (первая минута звучания русского романса). Подчеркивается слабая избирательность ответов нейронов первичной слуховых зоны животного на подобные звуки. Хотя далеко не во всех случаях средняя частота импульсации клеток во время действия звука превышала среднюю частоту фоновой активности, но практически все клетки воспроизводили некоторые особенности огибающей сигнала. Данные контрастируют с результатами, получаемые ранее почти исключительно на наркотизированных животных и при воздействии синтетических звуков. Косвенно они свидетельствуют о том, что уже в первичной слуховой коре определённый звуковой сигнал кодируется не отдельными нейронами – специфическими детекторами данного звука, а ансамблями одновременно реагирующих элементов.

REACTIONS OF NEURONS IN THE AUDITORY CORTEX OF AN UN ANESTHETIZED CAT TO THE ANTHROPOGENIC SOUNDS

© 2026 N. G. Bibikov*[1,2], I. N. Pigarev[2],

[1] N.N. Andreev Acoustic Institute, 117036, Moscow, Shvernik, 4

[2] A.A. Kharkovich Institute of Information Transmission Problems of the Russian Academy of Sciences, 127051, Moscow, B. Karetny Lane, 19, Building 1

E-mail: (nbibikov1@yandex.ru)

The reactions of neurons located in the primary auditory cortex of a non-anesthetized cat to ordinary sounds produced by humans, both in everyday communication and under special circumstances, were studied. These sounds included conversations, poetic and musical passages, nighttime snoring, and some other signals. Their duration was usually several tens of seconds, and the average sound pressure

level was 60-80 dB SPL. The responses of cells located in the high-frequency zone of the primary auditory cortex to a single musical passage (the first minute of a Russian romance) were analyzed in detail. The study highlights the weak selectivity of the responses of the animal's primary auditory zone neurons to such sounds. Although in many cases the average frequency of cell firing during sound exposure did not exceeded the average frequency of background activity, almost all cells reproduced some features of the signal envelope. These findings contrast with previous results obtained almost exclusively on anesthetized animals with synthetic sounds. They indirectly suggest that in the primary auditory cortex the signals are encoded not by individual neurons that are (specific detectors of that sound), but by ensembles of simultaneously responding elements.
Keywords: unanesthetized cat, auditory cortical region, single neurons, detector properties.
PACS: 87.19.La Neuroscience

Введение

В течение нескольких лет на установке разработанной и изготовленной И.Н. Пигаревым мы осуществляли исследование реакции одиночных нейронов первичной слуховой коры неанестезированной кошки на весьма разнообразные звуковые сигналы, которые это животное могло воспринимать в процессе своей жизнедеятельности. Методические аспекты работы уже многократно описаны [1-3] и в настоящей работе мы не будем на них специально останавливаться. Заметим только, что работа велась на ненаркотизированной тренированной кошке методом дифференциальной регистрации одиночных нейронов парой микроэлектродов. Электроды перемещались в вентральном направлении через первичное слуховое поле в области расположения нейронов с характеристическими частотами 12-18 кГц. Сигналы предъявлялись через высокочастотный динамик, расположенный в 20 см перед головой животного.

Как мы уже отмечали [4], свойства корковых нейронов нашей неанестезированной кошки существенно отличалось от данных, полученных на анестезированных животных [5,6]. Практически во всех исследованных нами участках слуховой коры регистрировалась спонтанная активность одиночных нейронов. Эта активность носила неслучайный характер и трактовалась нами как фрактальный процесс с пачечными разрядами различной длительности и положительной корреляцией между соседними межспайковыми интервалами [7].

При предъявлении сложных акустических стимулов не выявлялось жёсткой зависимости между силой ответа и характеристической частотой нейронной популяции вблизи регистрирующего электрода. Более того, в ряде случаев тоны, соответствующие характеристической частоте клетки, при большой интенсивности, после кратковременного ответа на включение могли вызвать подавление фоновой активности на всём протяжении звучания.

Избирательность ответов на сложные естественные сигналы, оцениваемая по средней частоте импульсации, также оказывалась весьма невысокой. При умеренной и высокой интенсивности стимулов реакция чаще проявлялась не столько в увеличении частоты разрядов,

сколько в синхронизации моментов возникновения спайков с текущими спектрально-временными характеристиками сигнала.

Представляет определённый интерес проанализировать реакцию нейронов первичной слуховой коры нашего объекта на довольно громкий (около 75 дБ УЗД) широкополосный сигнал, который не должен быть специально значимым для исследуемого животного. Мы предъявляли животному несколько десятков разных сигналов этого типа, но в качестве иллюстрации здесь рассмотрим реакцию только на один довольно короткий музыкальный фрагмент. Это первая минута звучания известного романса Фомина «Благодарю не надо». Сонограмма этого фрагмента показана в верхнем ряду рис.1. Он начинается резко с музыкального вступления, занимающего первые 9 секунд звучания. Затем музыка стихает и вступает голос певицы Галины Каревой. На участке от 10 до 25 секунд аккомпанемент отсутствует. Далее голос певицы сопровождается музыкой до 37 секунды, затем вновь идёт чисто музыкальный эпизод, после чего голос присутствует до конца выделенного фрагмента.

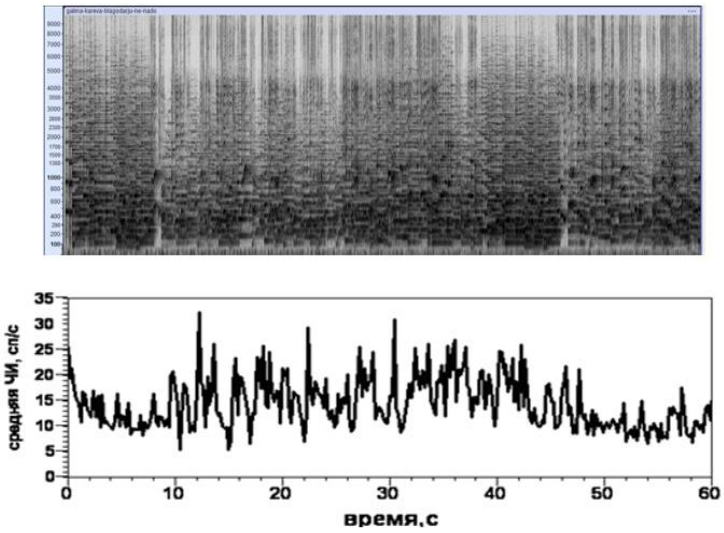


Рис.1. Реакция небольшой популяции нейронов первичной слуховой зоны коры неанестезированной кошки на начальный участок романса «Благодарю, не надо». Верхний ряд – сонограмма начальных 60 секунд звучания сигнала, нижний ряд - среднее значение частоты импульсации 22 случайно выбранных клеток первичной зоны слуховой коры на данный стимул.

Приведённая ниже кривая демонстрирует среднее значение частоты импульсации при воздействии указанного стимула у 22 исследованных в данном погружении случайно выделенных нейронов.. Заметим, что среднее значение фоновой импульсации, измеренное у этмх клеток на протяжении пяти секунд до начала стимула, составило 9.0 ±2.8 сп/с. Хотя реакция на сигнал в популяции, несомненно, присутствует, прямая корреляция ответа с его параметрами не выглядит вполне очевидной. Начальное резкое вступление звука вызывает только дву-

кратное и весьма краткое увеличение частоты спайков, а примерно со второй секунды звучания ответ всей популяции падает до уровня фоновой активности. Вступление голоса также не приводит сразу к уверенному возрастанию частоты. Скорее в ответе чередуются эпизоды резко повышенной плотности импульсации с участками, на которых частота импульсации вновь приближается к фоновой. Дальнейшее выпадение и последующее новое вступление вокала слабо отражено в популяционной активности исследованных клеток.

На следующем рисунке мы приводим реакцию на данный стимул 12 одиночных нейронов, случайно выбранных из нашей популяции. Десять из них представляют собой пять пар клеток, регистрируемых одновременно. Такие пары включают нейроны, близкие по расположению, но заведомо различающиеся по полярности и форме спайков.

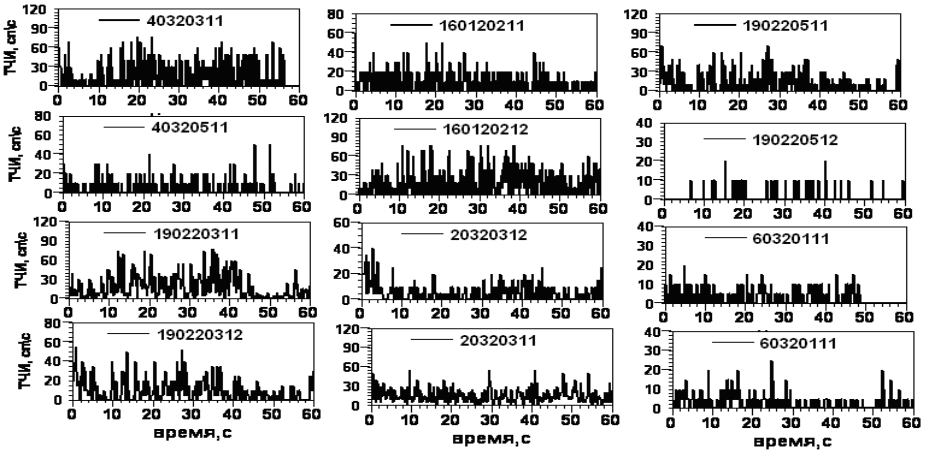


Рис.2. Постстимульные гистограммы реакции двенадцати одиночных нейронов первичной слуховой коры ненаркотизированнной кошки на музыкальный фрагмент длительностью 60с, предъявляемый через динамик, фронтально расположенный перед животным. ТЧК –текущая частота импульсации в спайках в секунду. Цифрами приведены номера файла, где последняя цифра указывает номер регистрируемой клетки.

Видно, что практически все клетки изменяют импульсацию при воздействии предъявленного стимула. Однако характер ответа этих клеток различен. Фактически отсутствует вполне ожидаемая картина – резкое повышение частоты импульсации в момент начала громкого звука и постепенное ослабление ответа в течение его звучания. Наоборот, начальный громкий музыкальный аккорд, длящейся до десятой секунды, чаще вызывает торможение импульсации (файлы: 040220311, 040220511, 190220311, 190220312, 160120212, 190220512).

В большинстве клеток наиболее эффективный ответ приходится на участок, в котором слышен голос певицы: примерно с 10 по 50-ую секунду (файлы: 040220311, 190220311, 190220312, 160120212, 190220512). Прекращение вокала приводит к ослаблению ответа почти во всех клетках. В некоторых случаях прямую связь реакции с параметрами сигнала выяснить не удаётся (файлы: 020320311, 020320312, 060320112).

Можно придти к заключению, что реакции исследованных нейронов не отличаются ни избирательностью, ни чёткой связью ответа с отдельными, ясно выраженными параметрами стимула. Видимо такая связь была бы выявлена при построении гистограмм реакции на множество идентичных повторений сигнала, однако в реальной жизни подобные условия не реализуются. Вывод, проиллюстрированный здесь одним примером, можно было сделать и после анализа ответов на подавляющее число иных сигналов достаточной интенсивности со сложным спектром.

Сопоставляя наши данные с результатами других авторов, необходимо иметь в виду важные методические отличия, которые сводятся к отсутствию в наших экспериментах каких бы то ни было химических воздействий на мозг животного. Работа в таких условиях велась в 60-70 годах прошлого века, но затем надолго прервалась, возобновившись только в условиях хронических экспериментов с полным контролем этических требований. Применительно к кошачьим с полной уверенностью можно говорить о выполнении этих требований в лаборатории ИППИ РАН и в совместной японо-китайской лаборатории [8,9].

Работы, выполнявшиеся с применением наркотических средств, прежде всего характеризуют то состояние мозга, которое достигнуто при использовании именно данного вещества. Исследования, с применением хлоралозы и нембутала, описывали состояние мозга, в котором нейроны коры не генерируют в течение действия стимула, отвечая только на его передний фронт [5]. Переход на другие типы наркоза (обычно кетамино-уретановую смесь [6]) обеспечил восстановление фоновой активности, но не позволял получить все свойства нормально функционирующих клеток.

Качественно наши данные близки к результатам японо-китайской группы исследователей, зарегистрировавшей ответы сотен нейронов слуховой коры [8,9]. Для стимуляции авторы использовали внутривидовые сигналы кошек и ряд фонем английской речи. Как следует из приведённых иллюстраций, не только экологически значимые звуки, но и все другие сигналы, не несущие информационной нагрузки, приводили к изменению временного течения импульсации у подавляющего числа изученных клеток.

Заметим также что клетки, активно реанирующие на сигнал, располагались в зоне первичной слуховой коры, тонотопически сооветствующей характеристическим частотам выше 10 кГц. Такие частоты практически отсутствовали в спектре предъявляемого сигнала. В этой связи можно указать на недавнюю работу, в которой были выявлены дефекты речевого восприятия у лиц с нормальной аудиограммой в речевом диапазоне, но с потерей слуховой чувстаительности на частотах выше 8 кГц [11]. Авторы подчёркивают роль высокочастотных зон коры в анализе любых сложных стимулов.

Заключение

Результаты нашей работы никак не соответствуют широкораспространённой гипотезе о кодировании конкретных звуковых образов узко специализированными нейронами - детекторами определённого сигнала. Более приемлемым является предположение, что выходом первичной слуховой коры является совокупность синхронно реагирующих в данный момент клеток. Ясно что число таких временно живущих ансамблей может быть неисчислимо высоким. Некоторые современные данные, позволяющие регистрировать одновременно актвность более тысячи клеток, дают надежду на прогресс в отношении понимания принципов функционирования подобных клеточных ансамблей.

Список литературы

1. *Бибиков Н.Г. Пигарев И.Н.* Ответы корковых нейронов интактной кошки на некоторые окружающие естественные звуки // Материалы XXXIV сессии Российского акустического общества 2022. С. 878-884. doi:10.34756/GEOS.2021.17.38058
2. *Бибиков Н.Г. Пигарев И.Н.* Представленность сердечных сокращений в слуховых отделах височной коры у ненаркотизированной кошки // Сенсорные системы. 2024. **38.** № 4. С. 60–77. doi: 10.31857/S0235009224040068
3. *Бибиков Н.Г. Пигарев И.Н.* Взаимозависимость активности близкорасположенных нейронов коры мозга кошки в условиях медленноволнового сна// Российский физиологический журнал им. И.М. Сеченова. 2018. **104**. № 1. С. 53-67.).
4. *Бибиков Н.Г.* Функциональное исследование первичной слуховой коры кошки // Сенсорные системы 2021. **35**, № 2. С.103-134
5. *Brugge J.F., Dubrovsky N.A., Aitkin L.M., Anderson D.J.* Sensitivity of Single Neurons in Auditory Cortex of Cat to Binaural Tonal Stimulation; Effects of Varying Interaural Time and Intensity // J. Neurophysiol. 1969. **32**. P. 1005–1024. doi: 10.1152/jn.1969.32.6.1005
6. *Eggermont J.J.* Representation of a voice onset time continuum in primary auditory cortex of the cat // J. Acoust. Soc. Am. **98.** № (2 Pt 1). P. 911-920. doi: 10.1121/1.413517.
7. *Bibikov N.G., Makushevich I.V.* Dynamics of background and evoked activity of neurons in the auditory cortex of the unanaesthetized cat.// in: Kryzhanovsky, B., Dunin-Barkowski, W., Redko, V., Tiumentsev, Y. (eds) Advances in Neural Computation, Machine Learning, and Cognitive Research VI. NEUROINFORMATICS 2022. Studies in Computational Intelligence, 2023. **1064.** P. 183-190. doi: 10.1007/978-3-031-19032-2_18
8. *Qin L., Kitama T., Chimoto S., Sakayori S., Sato Y.* Time course of tonal frequency-response-area of primary auditory cortex neurons in alert cats.// Neuroscience Res. 2003. **46.** №. 2, P. 145-152. doi: 10.1016/S0168-0102(03)00034-8
9. *Qin L., Wang J.Y., Sato Y.* Representations of cat meows and human vowels in the primary auditory cortex of awake cats// J. Neurophysiol. 2008. **99.** P. 2305–2319. doi:10.1152/jn.01125.2007
10. *Aryal S., Cheng FY., Mishra S.K., Smith S* . Brainstem encoding of speech in the extended high frequencies and its behavioral correlates// J. Neurophysiol. 2026. **135**. №1. P. 190-201. doi: 10.1152/jn.00464.2025.
11. *Filipchuk A., Schwenkgrub J.* Awake perception is associated with dedicated neuronal assemblies in the cerebral cortex// Nature Neuroscience. 2022. **25.** P. 1327–1338. doi:10.1038/s41593-022-01168-5.

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39729

Об упорядоченности временной структуры спонтанной активности нейронов слуховых центров мозга

Егорова М.А., Акимов А.Г., Хорунжий Г.Д.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт эволюционной физиологии и биохимии им. И.М. Сеченова Российской академии наук, Санкт-Петербург

Тел.: +7(921)341-7163; E-mail: ema6913@yandex.ru

В работе анализировали временные параметры спонтанной активности одиночных нейронов первичной слуховой коры мышей. У всех исследованных нейронов слуховой коры показана высокая спонтанная активность, у наркотизированных животных имевшая строгую временную упорядоченность. Спонтанные импульсы в разряде каждого нейрона формировали пачки из 4-9 спайков. Частота генерации пачек составляла от 6 до 16 Гц и соответствовала альфа-диапазону частот суммарной ритмической активности неокортекса. Отдельные пачки спонтанной активности у большинства нейронов формировали более крупные временные паттерны, условно обозначенные нами как «гиперпачки». Анализ вариабельности и периодичности временных паттернов спонтанной активности корковых слуховых нейронов в течение периода регистрации выявил признаки периодического процесса. В тоже время, у бодрствующих мышей спонтанная активность нейронов первичной слуховой коры не имела временной упорядоченности. Обсуждаются возможные механизмы формирования временных паттернов спонтанной активности одиночных нейронов слуховой коры у наркотизированных и бодрствующих животных.

Исследование выполнено за счет средств федерального бюджета по государственному заданию № 075-00264-26-00.

Ключевые слова: слуховые центры мозга, одиночные нейроны, домовая мышь, спонтанная активность, временные паттерны ответов

УДК: 612.85 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39730

Свойства суммарных слуховых ответов ствола мозга крыс в условиях нарушения функции транспортера дофамина DAT-1

Хорунжий Г.Д., Егорова М.А.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт эволюционной физиологии и биохимии им. И.М. Сеченова Российской академии наук.

Россия, г. Санкт-Петербург, пр. Тореза, д. 44.

E-mail: khorunzhii.gd@gmail.com

В работе регистрировали коротколатентные стволовые слуховые вызванные потенциалы (КСВП) у крыс линий Wistar и трансгенной гетерозиготной лини DAT-HET со сниженной экспрессией гена, кодирующего транспортер обратного захвата дофамина DAT1, в ответ на парные щелчки и одиночные звуковые тоны и анализировали их характеристики. Сравнительный анализ временных параметров КСВП показал, что у крыс линий Wistar и DAT-HET латентности отдельных компонентов суммарных слуховых ответов ствола мозга в разной степени зависят от частоты предъявляемых тональных сигналов. Полученные данные могут быть значимыми для поиска дополнительных критериев, которые можно использовать в спорных и неоднозначных ситуациях при диагностике социально-значимых патологий, обусловленных нарушением функций дофаминергической системы.

Ключевые слова: крыса, дофаминергическая система, трансгенные животные, слух, КСВП

PACS: 43.60.−c

Введение

Известно, что дофаминергическая нейротрансмиссия играет ключевую роль в модуляции реакций нейронов слуховых центров на звук [1], а на периферии слуховой системы (на уровне первичных слуховых афферентов) вовлечена в регуляцию чувствительности кортиева органа к звуковому раздражителю [2, 3]. О ее принципиальной значимости для процессов обработки звука слуховой системой свидетельствуют результаты работ, в которых нейротоксины, избирательно повреждающие дофаминергические нейроны, агонисты и антагонисты дофаминовых рецепторов (главным образом, D1 и D2), вводили в перилимфу кортиева органа или апплицировали на поверхность стволовых слуховых центров [4, 5]. На уровне слухового центра среднего мозга исследован вклад дофаминергической модуляции нейрональных реакций в обеспечение контекстно-зависимой обработки акустических стимулов [5]. Получены данные об участии дофаминергической нейротрансмиссии в модуляции ответов нейронов наружного ядра задних холмов крысы на неожиданные звуковые сигналы [6].

У пациентов, страдающих болезнью Паркинсона, развитие которой обусловлено повреждением дофаминергических нейронов, выявлены нарушения слухового восприятия [7]. Ухудшение слуха пациентов, по данным некоторых исследователей, является ранним симптомом болезни Паркинсона, предваряющем развитие моторных нарушений [8]. Кроме того, в исследованиях другой патологии центральной нервной системы, обусловленной дисфункцией дофаминергических нейронов – синдрома дефицита внимания и гиперактивности (СДВГ), обнаружена взаимосвязь снижения слуховой чувствительности и развития тяжелых форм СДВГ у пациентов детского возраста [9].

Таким образом, влияние дофаминергической нейротрансмиссии на анализ воспринимаемых звуковых сигналов проявляется на разных уровнях в восходящем слуховом пути – от рецепторов до высших слуховых центров, что придает актуальность изучению слуховых коррелят патологий дофаминергических нейронов. При этом, все перечисленные выше исследования, авторы которых изучали модуляцию дофамином слуховых ответов одиночных нейронов и их популяций, выполнены в условиях внесения дофамина, а также агонистов и антагонистов дофаминовых рецепторов извне в ходе острого эксперимента. В литературе практически отсутствуют какие-либо сведения об особенностях ответов одиночных нейронов или же нейрональных популяций стволовых центров слуха у животных с нарушением функций системы дофаминергических нейронов.

Цель настоящей работы, таким образом, состояла в оценке влияния патологического изменения дофаминергической нейротрансмиссии на временные характеристики слуховых ответов ствола мозга крыс с дисфункцией транспортера обратного захвата дофамина.

1 Материалы и методы

Работа выполнена на крысах линии Wistar и трансгенной линии DAT-HET (гетерозиготы, получены в Институте трансляционной биомедицины СПбГУ), самках в возрасте 6 - 8 месяцев. В экспериментах использованы 20 крыс линии Wistar и 20 крыс линии DAT-HET.

Для оценки слуховой чувствительности исследуемых крыс линий Wistar (контроль) и DAT-HET выполняли регистрацию КСВП и анализировали их амплитудные и временные параметры. Регистрацию проводили в условиях общей анестезии, поддерживаемой внутримышечными инъекциями телазола (тилетамин+золазепам, 25 мг/кг массы крысы) и ксилазина (ромпун, 0.7 мг/кг) каждые 2 – 2.5 часа, в ответ на парные звуковые щелчки и одиночные тональные сигналы. Животное в течение всего времени эксперимента размещали в звукозаглушенной, анэхоидной камере.

Акустические сигналы генерировали, используя возможности компьютерной системы Sinutronic V1 (Albotronic, Германия). Тональные сигналы длительностью 100 мс и временем

нарастания и спада 5 мс, а также прямоугольные импульсы длительностью 100 мс с выхода компьютерной системы поступали на аттенюатор и далее - на усилитель мощности (Амфитон 25У-002С) и электродинамический излучатель Fostex FT17H с межимпульсным интервалом 300 мс. Частоты тональных сигналов, используемых при регистрации КСВП, составляли 2, 4, 8, 10, 16, 20, 24, 30, 32 и 45 кГц. Тестовые тоны предъявляли последовательно по 1000 повторений сигнала каждой частоты. Парные щелчки также предъявляли 1000-кратно. Звукоизлучение производилось в открытом поле на расстоянии 60 см от головы животного по средней линии. В точке, соответствующей положению ушной раковины крысы, измеряли УЗД звуковых стимулов с помощью измерительной аппаратуры Брюль & Кьер (Дания) – 6.5 мм микрофона 4135, предусилителя 2633 и измерительного усилителя 2606. При максимальных значениях используемых сигналов (90 дБ УЗД) уровень основной частоты по крайней мере на 35 дБ (а как правило, более, чем на 50 дБ) превышал уровень продуктов искажений.

Регистрацию КСВП производили подкожными серебряными электродами (серебряные проволоки диаметром 0.25 мм). Активный электрод закрепляли в коже головы животного в области вертекса, индифферентный – сразу за правым ухом. Клипсу заземления размещали на кончике хвоста. КСВП регистрировали при помощи усилителя ДАМ-50Е WPI. Далее ответ отфильтровывали (200 Гц – 5 кГц), дополнительно усиливали в 10 раз при помощи фильтра Kemo VBF8 (Великобритания) и выводили на интерфейс CED1401plus (Великобритания) для дальнейшего введения данных в компьютер, суммирования вызванных потенциалов (процедура накопления, программа CED Spike 2.6.1) и их статистической обработки. Данные суммировали по всем повторениям стимулов. Активность, регистрируемую при помощи усилителя DAM-50, дополнительно подавали на вход четырехканального осциллографа Tektronix MSO 2024 (США), что позволяло визуально контролировать ее характеристики и оценивать глубину анестезии.

Измерение амплитудных и временных параметров компонентов КСВП (пиковой амплитуды и латентного периода) производили при помощи программного обеспечения CED Spike 2.6.1. Латентный период (латентность) каждого пика КСВП оценивали как промежуток времени от начала действия звукового сигнала до момента достижения максимальной амплитуды (т.е. вершины) пика с учетом акустической задержки, составлявшей 0.6 мс (рис. 1). Все процедуры статистической обработки полученных данных производили с помощью программных пакетов STATISTICA 10 и SigmaPlot 12.1

2 Результаты

КСВП, зарегистрированные у животных обеих линий при действии тональных

сигналов и звуковых щелчков, состояли из 5 волн (пиков) со средним латентным периодом 2.2 мс (первый пик) – 5.6 мс (пятый пик) (рис. 1).

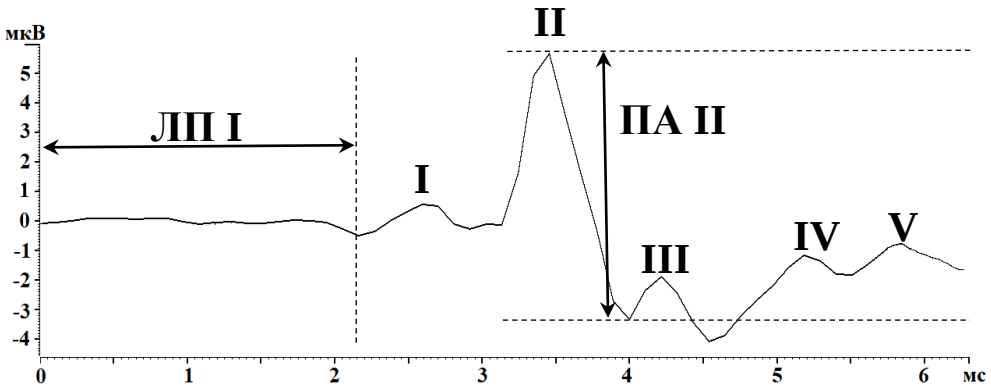


Рис. 1. Пример типичного КСВП крысы гетерозиготной линии DAT-HET в ответ на звуковой щелчок уровнем 90 дБ УЗД. Абсцисса – время, мс; ордината – амплитуда, мкВ. Компоненты КСВП обозначены римскими цифрами. Пунктирными линиями и стрелками отмечены латентный период компонента I (ЛП I) и пиковая амплитуда компонента II (ПА II).

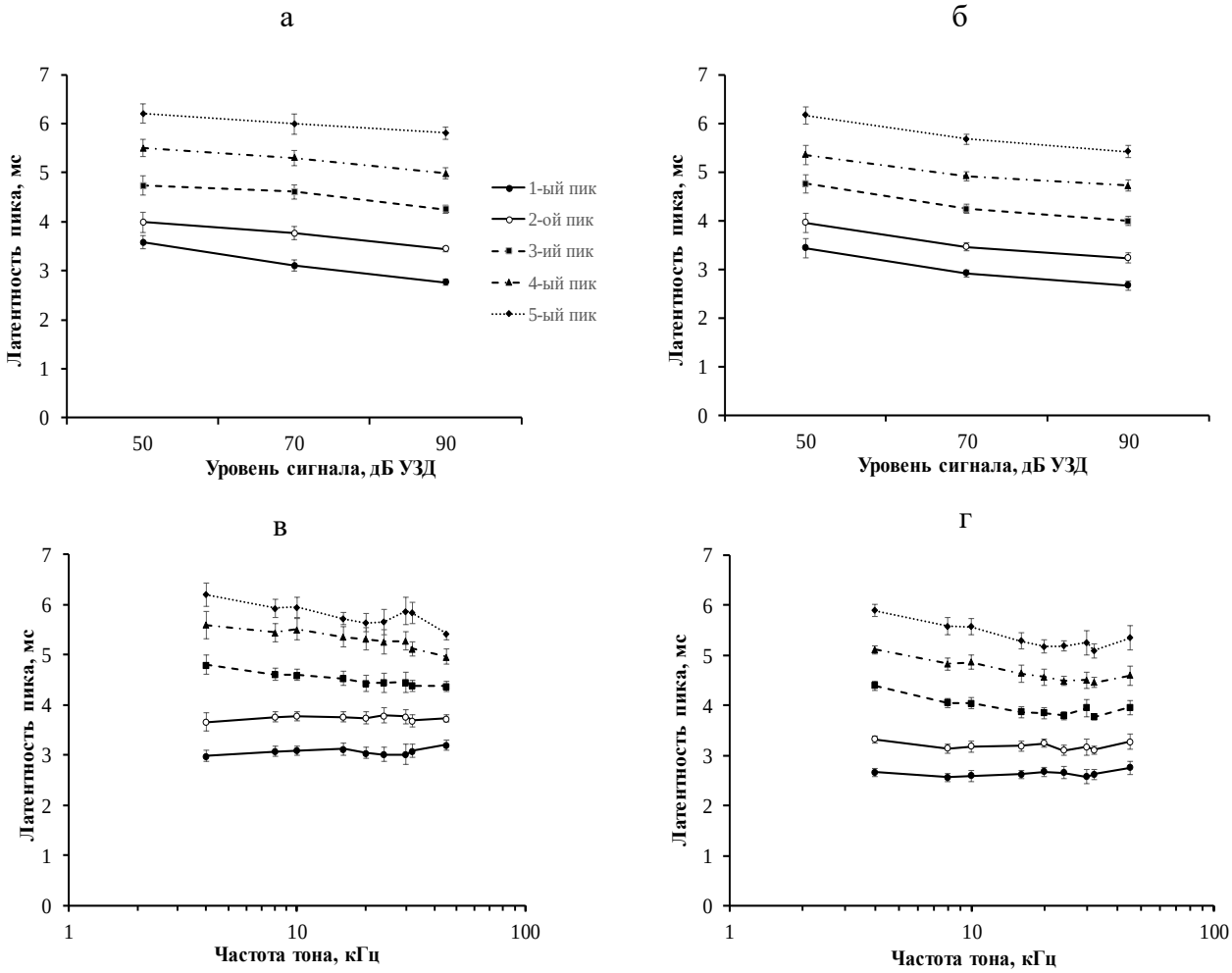


Рис. 2. Временные характеристики суммарных ответов слуховых центров ствола мозга интактных и трансгенных крыс на тональные сигналы. Верхний ряд – зависимость средних латентностей пиков I-V КСВП крыс линий Wistar (а) и DAT-HET (б) от уровня звуковых тонов. Абсцисса – уровень сигнала, дБ УЗД, ордината – средняя латентность пиков КСВП, мс; x +/- SE. Нижний ряд - зависимость средних латентностей пиков I-V КСВП крыс линий Wistar (в) и DAT-HET (г) от частоты тональных сигналов уровнем 90 дБ УЗД. Абсцисса – частота сигнала, кГц, ордината – средняя латентность пиков КСВП, мс; x +/- SE.

При предъявлении звуковых щелчков латентные периоды отдельных пиков КСВП не различались в тестовой и контрольной группах ($p > 0.5$, тест Манна-Уитни). Их средние значения при действии щелчков уровнем 90 дБ УЗД составляли у крыс линии Wistar 2.2 ± 0.37 мс, 2.9 ± 0.35 мс, 3.8 ± 0.48 мс, 4.6 ± 0.60 мс и 5.6 ± 0.72 мс для компонентов I, II, III, IV и V, соответственно. У гетерозигот DAT-HET компоненты I-V КСВП в ответ на щелчки того же уровня имели латентности 2.3 ± 0.37 мс, 2.9 ± 0.45 мс, 3.8 ± 0.55 мс, 4.5 ± 0.75 мс и 5.3 ± 0.81 мс. С понижением уровня звука до 50 дБ УЗД в обеих группах экспериментальных животных наблюдали увеличение латентностей волн I – V в пределах десятых долей миллисекунды, а именно, на 0.3 - 0.6 мс у крыс линии Wistar и на 0.3 - 0.7 мс у крыс-гетерозигот DAT-HET. Иными словами, характер изменения временных параметров КСВП в зависимости от уровня парных щелчков был идентичен у крыс контрольной и тестовой групп.

Волны КСВП в ответ на звуковые тоны уровнем 90 дБ УЗД у интактных крыс линии Wistar, в среднем, имели латентности 2.8 ± 0.24 мс, 3.4 ± 0.20 мс, 4.3 ± 0.33 мс, 5.0 ± 0.42 мс и 5.8 ± 0.48 мс для волн I, II, III, IV и V, соответственно (рис. 2, а). У крыс DAT-HET при действии таких же сигналов волны I – V КСВП развивались со средними латентными периодами, составляющими 2.7 ± 0.36 мс, 3.2 ± 0.39 мс, 4.0 ± 0.36 мс, 4.7 ± 0.40 мс и 5.4 ± 0.46 мс (рис. 2, б). Таким образом, латентности пиков КСВП нормальных и трансгенных крыс, усредненные по всем животным соответствующей группы при действии тональных сигналов уровнем 90 дБ УЗД, достоверно не различались ($p > 0.5$, тест Манна-Уитни, рис. 2, а, б).

Сравнение средних латентных периодов волн КСВП, зарегистрированных у крыс контрольной и тестовой групп в ответ на тоны уровнем 50 дБ УЗД и 70 дБ УЗД, также не выявило достоверных различий ($p > 0.5$, тест Манна-Уитни).

У крыс линии Wistar латентности пиков КСВП, вызванных тональными сигналами, слабо зависели от частоты звука (рис. 2, в). Только при действии тонов уровнем 90 дБ УЗД с невысоким уровнем значимости наблюдали уменьшение латентностей III и V волн КСВП на 0.1 - 1.5 мс у разных крыс с ростом частоты сигналов в диапазоне 4 – 45 кГц ($p < 0.05$, ANOVA on Ranks, Dunn’s test, рис. 2, в). У крыс крыс-гетерозигот DAT-HET взаимосвязь между латентностями пиков и частотой тональных сигналов была выражена в большей степени, чем у интактных крыс линии Wistar (рис. 2, г). В тестовой группе латентности пиков III - V КСВП с повышением частоты тонов уровнем 70 дБ УЗД и 90 дБ УЗД уменьшались на 0.3 – 6 мс ($p < 0.01$, ANOVA on Ranks, Dunn’s test). При понижении уровня тональных сигналов до 50 дБ УЗД значимая взаимосвязь с частотой звука у крыс тестовой группы сохранялась для латентностей III компонента КСВП – они уменьшались на 0.2 – 5 мс по мере

роста частоты в диапазоне 4 – 45 кГц ($p < 0.05$, ANOVA on Ranks, Dunn's test). Таким образом, у крыс-гетерозигот DAT-HET, и, в существенно меньшей степени, у интактных крыс линии Wistar наблюдали значимое уменьшение латентных периодов поздних компонентов КСВП при повышении частоты тональных сигналов.

Заключение

Результаты настоящего исследования продемонстрировали сходство временных параметров КСВП интактных крыс линии Wistar и крыс-гетерозигот трансгенной линии DAT-HET. Эти данные находятся в соответствии как с результатами поведенческих тестов, не выявивших существенных различий в реакциях крыс линии Wistar и крыс-гетерозигот DAT-HET на сенсорные стимулы [10], так и с выводами нашего недавнего исследования, показавшего, что амплитудные характеристики КСВП крыс линий Wistar и DAT-HET, в основном, сходны [11].

Вместе с тем, мы обнаружили у исследованных животных различия в характере взаимосвязи латентных периодов пиков КСВП и частоты звуковых сигналов. У крыс-гетерозигот DAT-HET латентности волн III - V значимо уменьшались с повышением частоты тональных сигналов уровнем 70 – 90 дБ УЗД, в то время как у интактных крыс линии Wistar латентности всех волн КСВП, за исключением волны III, не зависели от частоты звука. Следует отметить, что в работах, посвященных изучению дофаминергической модуляции ответов нейронов стволовых слуховых центров, показано, что на уровне задних холмов среднего мозга дофамин участвует в формировании нейрональных реакций на неожиданные сигналы [6] и обеспечивает контекстно-зависимую обработку биологически значимых акустических стимулов [5]. При этом, известно, что большинство вокализаций крыс, по-видимому, являющихся значимыми для конспецифика, имеют частоты в диапазоне 20 – 60 кГц [12].

В этой связи логичным выглядит предположение, что повышение содержания внеклеточного дофамина у крыс-гетерозигот приводит к уменьшению латентностей ответов нейронов слуховых центров ствола мозга на звуки, по частоте соответствующие биологически значимым видоспецифическим вокализациям, тем самым облегчая слуховые реакции крысы на эти сигналы.

Работа поддержана федеральным бюджетом по госзаданию № 075-00264-26-00

Список литературы

1. *Fyk-Kolodziej B.E., Shimano T., Gafoor D., Mirza N., Griffith R.D., Gong T.W., Holt A.G.* // Front Neuroanat. 2015. V. 9. eCollection 2015.

2. *Maison S.F., Liu X.P., Eatock R.A., Sibley D.R., Grandy D.K., Liberman M.C.* // J Neurosci. 2012; 32(1): 344-355.
3. *Wu J.S., Yi E., Manca M., Javaid H., Lauer A.M., Glowatzki E.* // Elife. 2020; 9: e52419.
4. *Le Prell C.G., Halsey K., Hughes L.F., Dolan D.F., Bledsoe S.C.* // JARO. 2005; 6: 48–62.
5. *Hoyt J.M., Perkel D.J., Portfors C.V.* // Eneuro. 2019. V. 6(5): ENEURO-0350.
6. *Valdés-Baizabal C., Carbajal G.V., Pérez-González D., Malmierca, M.S.* // PLoS Biology. 2020; 18(6): e3000744
7. *Jafari Z., Kolb B.E., Mohajerani M.H.* // Movement Disorders.2020. V .35(4). P. 537-550.
8. *Jose M., Nene D., Choi M.W.Y., Yu A.C., Small J., Mirian M., Jenstad L., Appel-Cresswel S.* // Clinical Neurology and Neurosurgery. 2024. V. 246: 108524-108524.
9. *Tsur N., Zloof Y., Rittblat M., Reuven Y., Simchoni M. et al.* // Otol Neurotol. 2024; 45(3): e142-e146.
10. *Sanna F., Bratzu J., Serra M.P., Leo D., Quartu M., Boi M., Espinoza S., Gainetdinov R.R., Melis R.R., Argiolas A.* // Frontiers Behav. Neurosci. 2020. V. 14. eArticle 58.
11. *Хорунжий Г.Д., Егорова М.А., Фесенко З. С., Ефимова Е В.* // Вестник Московского университета. Серия 16. Биология. 2025. Т. 80(3): 165-172.
12. *John S.R., Tiwari R., Goussha Y., Amar R., Bizer A., Netser S., Wagner S.* // Cell Rep. Methods. 2023. V. 3(11) P: 100638.

УДК 594.124+57.043+534-143 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39731

Пилотные эксперименты по изучению воздействия акустических сигналов антропогенного происхождения на серого тюленя в акватории Баренцева моря

А.К. Британков[1,a], А.А. Зайцев[2,b], М.В. Пахомов [2,c], М.Б. Салин [1,d], А.П Яковлев [2,f] [1]

Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова Грехова Российской академии наук. Нижний Новгород, 603951, ул. Ульянова, 46.

[2] *Мурманский морской биологический институт Российской академии наук. Мурманск, 183038, ул. Владимирская, д. 17.*

E-mail: [a]britenkov@ipfran.ru, [b]zaytsev@mmbi.info, [c]edr750v@yandex.ru, [d] mikesalin@ip-fran.ru, [f] yakovlev@mmbi.info

Аннотация. Влияние антропогенных шумов на морские организмы является предметом исследования на протяжении последних десятилетий, однако последствия подобного воздействия, особенно в морских труднодоступных регионах недостаточно изучено. Возрастающий интерес к освоению Арктического региона приводит к увеличению антропогенной нагрузки на местные экосистемы, в этой связи мониторинг различных индикаторов устойчивого состояния экосистем (к которым относятся в том числе и ластоногие являющиеся консументами высшего порядка) становится ключевым аспектом рационального природопользования в этом регионе. В докладе представлены результаты исследований, проведенных на аквакомплексе ММБИ РАН, направленных на оценку восприимчивости серого тюленя (*Halichoerus grypus*) к воздействию звуковых сигналов искусственного происхождения, а также на регистрацию сигналов их коммуникации. Затронуты проблемы определения звукового давления, при котором наблюдаются отклонения поведенческих реакций содержащихся на аквакомплексе тюленей и показано изменение их вокализации в воздухе и воде после воздействия звуковых сигналов.

Ключевые слова: экология, *Halichoerus grypus*, серый тюлень, шумовое загрязнение, поведение, гидроакустический излучатель, акустическая мощность, гидроакустика

Pilot experiments to study the impact of anthropogenic acoustic signals on grey seals in the Barents Sea

А.К. Britenkov [1,a], A.A. Zaitsev [1,b], M.V. Pakhomov [2,c], M.B. Salin [1,d], A.P. Yakovlev [2, f]

[1] *Federal Research Center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences (IAP RAS). Nizhny Novgorod 603951, Russia.*

[2] *Murmansk Marine Biological Institute of the Russian Academy of Sciences (MMBI RAS), Murmansk 183038, Russia*

E-mail: [a]britenkov@ipfran.ru, [b]zaytsev@mmbi.info, [c]edr750v@yandex.ru, [d] mikesalin@ip-fran.ru, [f] yakovlev@mmbi.info

Abstract. The impact of anthropogenic noise on marine organisms has been the subject of research for decades, but the consequences of such impacts, particularly in remote marine regions, remain poorly understood. With the development of the Arctic, monitoring indicators of the sustainability of local ecosystems is becoming increasingly important. These include species such as the ringed seal (Pusa hispida) and gray (Arctic) seal (Halichoerus grypus), which inhabit the North Atlantic and southern waters of the Arctic Ocean and are found from the west coast of Canada and the northwestern United States to the eastern shores of Severnaya Zemlya. This report presents the results of research conducted in 2025 at the MMBI RAS aquatic complex to assess the susceptibility of gray seals to artificial sound and to record their communication signals. The report addresses the challenges of determining sound pressure levels at which behavioral changes in seals housed in the aquatic complex are observed, and demonstrates changes in their vocalizations in the air and water after exposure to sound signals.

Keywords: ecology, *Halichoerus grypus*, gray seal, noise pollution, behavior, hydroacoustic emitter, sound pressure, acoustic power, hydroacoustics

PACS: 43.80.Nd, 07.64.+z, 43.30.+m

1 Введение

Изучение влияния антропогенного шума на морскую биоту является одним из динамично развивающихся направлений морской биологии [1]. Интерес к проблеме шумового загрязнения связан, прежде всего, с увеличением интенсивности судоходства, а также с развитием добычи полезных ископаемых на морском шельфе [2]. В Российской Федерации освоение морей и океанов главным образом связано с расширением использования акватории Северного Ледовитого океана и прилегающих территорий. Присутствие в Арктике увеличивает актуальность мониторинга таких индикаторов устойчивого состояния ее экосистем, как биоразнообразие планктона и бентоса, состояние популяций ключевых видов фауны, концентрации загрязняющих веществ, физико-химических показателей и климатических условий. В качестве представителей морских экосистем, использующихся в

качестве индикаторов устойчивого состояния акваторий в Арктике целесообразно рассматривать ластоногих, являющихся одними из самых крупных хищников, замыкающих пищевую цепь. Подобным индикатором устойчивого состояния экосистем в прибрежных и морских районах Российской Федерации может являться серый (арктический) тюлень (*Halichoerus grypus*), обитающий в северной части Атлантики и южных водах Северного Ледовитого океана и встречающий от западного побережья Канады и северо-запада США вплоть до восточных берегов Северной Земли. Распространенность этого вида позволяет проводить исследования довольно широко, допуская, в том числе и лабораторные эксперименты, поскольку серый тюлень может содержаться в условиях неволи.

2 Исследования акустического воздействия на ластоногих

Перспективным направлением исследований акустического воздействия на ластоногих является выделение основных акустических сигнатур, которые оказывают наибольшее воздействие на поведение и физиологию животных при излучении звука с заданными характеристиками, например, имитирующих звук морского или авиатранспорта. Научный интерес представляет также исследование вокализации и коммуникации морских млекопитающих [3] и влияния акустических шумов на эти процессы.

В некоторых работах, где достаточно подробно описано влияние звуков на физиологию и поведение морских млекопитающих [4] отмечается, что заметное воздействие на ластоногих и китообразных оказывает звуки с уровнем акустического давления свыше 150 дБ (относительно 1 мкПа), возникающие при сейсмографических работах или попадании животных в зону излучения мощных сонаров.

3 Вокализация и коммуникация ластоногих

Серые тюлени используют акустические сигналы для коммуникации, как в воздухе, так и под водой, при этом под водой набор издаваемых животными звуков гораздо сложнее [5]. Диапазон частот издаваемых серыми тюленями звуков обычно составляют менее 3 кГц, хотя его верхняя граница для звуков типа щелчков может достигать 15-30 кГц. В большинстве звуковых сигналов преобладают низкочастотные составляющие: репертуар тюленя в основном состоит из низкочастотных урчаний (100-500 Гц) и гортанных рыков (100-3000 Гц). Значительно реже серые тюлени издают щелчки и стуки (3 кГц). Некоторые из издаваемых серыми тюленями звуков похожи на хлопки ластами [6]. Интенсивность издаваемых звуков имеет выраженную сезонную динамику, возрастающую в период щенки и гона и снижающуюся в период нагула. В ряде исследований отмечены особенности вокализации в зависимости от места рождения, где тюлень впитывает «местный диалект» [7].

4 Исследование воздействий звука на ластоногих в условиях аквополигона

Проведенные в 2018 году на аквополигоне ММБИ РАН исследования по изучению

способности серых тюленей запоминать и различать схожие по амплитудно-частотным характеристикам звуковые сигналы показали, что имитация звука дизельного двигателя на холостом ходу при уровне звукового давления 60-70 дБ является для серых тюленей воспринимаемым звуковым стимулом, так как подобные звуки составляют основу техногенного шума в местах обитания диких тюленей [9]. Первой реакцией тюленей на подобный раздражитель являются попытки уйти от нового неизвестного стимула, количество которых довольно быстро снижается. В дальнейшем у животных возникает стойкий дифференцированный с другими раздражителями условный рефлекс на заданный звуковой сигнал, который все исследуемые тюлени достоверно отличают от схожих раздражителей. Время появления реакции на новый внешний стимул носит индивидуальный характер.

5 Эксперименты с воздействием когерентных гидроакустических сигналов на тюленей

В ходе исследований в октябре 2025 года на аквополигоне ММБИ РАН эксперименты по оценке воздействия сигналов, типичных для работы гидроакустических средств и устройств звукоподводной связи, проводились с 10 содержащимися в вольерах животными (рис. 1).

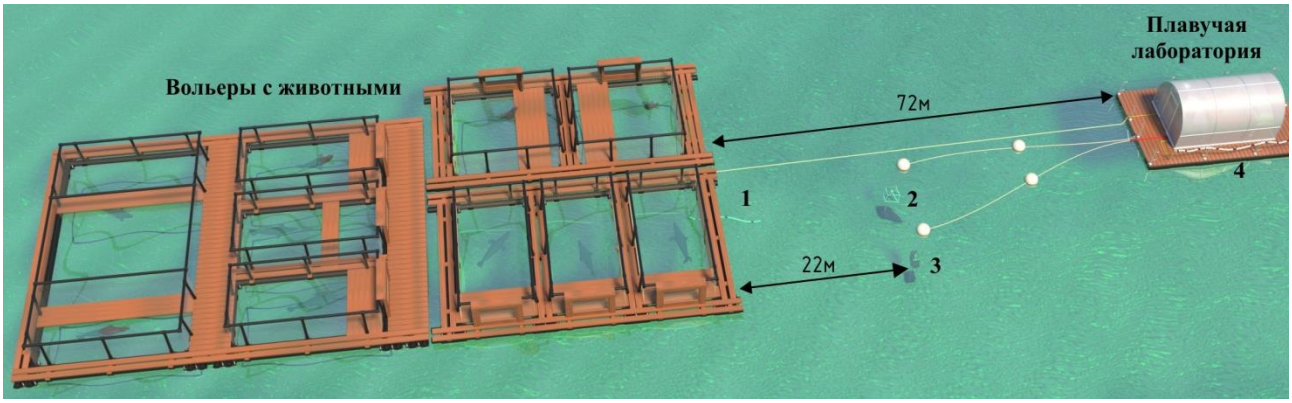


Рис. 1. Расположение на полигоне оборудования и вольеров с животными. 1 – гидроакустическая антенна, 2, 3 – гидроакустические излучатели, 4 – понтон с оборудованием (лаборатория).

Низкочастотные гидроакустические излучатели (НЧИ) находились на глубине 3-4 м (в зависимости от фазы прилива) на расстоянии около 1,5 м от дна и удалении от 7 м до 20 м от вольеров с животными. Ближе к вольерам располагался НЧИ инерционно-изгибного типа и 3D НЧИ [9] на дальней дистанции. Регистрация излучаемых сигналов и вокализации животных производилась линейной гидроакустической антенной, расположенной в непосредственной близости от вольеров (1-2 м), а поведение – при помощи видеокамеры с дистанционной трансляцией на монитор, установленный на понтоне с оборудованием.

Поскольку управляющее оборудование и технические средства контроля были удалены более чем на 50 м от вольерного комплекса, исключалось воздействие непривычных для животных объектов. С другой стороны, НЧИ располагались относительно вольерного комплекса так, чтобы обеспечить излучение на всех животных с примерно одинаковым уровнем акустической мощности. Звуковое давление, развиваемое НЧИ, рядом с вольерами

животных составляло 100-150 Па (0.08-0.09 Вт). Для корректной регистрации вокализации тюленей микрофона линейной антенны располагались для достжения необходимого для распознавания и анализа сигналов соотношения уровней вокализации животных и фонового шума. Тем не менее, в подобных условиях полигона, проблематично обеспечить воздействие на всех испытуемых животных с одинаковой интенсивностью.

В качестве воздействия излучались серии гидроакустических сигналов продолжительностью по 3 с каждый по 10 повторений (с интервалом 5 мин между сериями) с акустической мощностью 10-15 Вт, а также с пониженной в несколько раз. Звуковые файлы записанные в ходе экспериментов, содержат в которых эпизодические сигналы, характерные для надводной и подводной вокализации тюленей. Следует отметить, что записи содержат звуки не только вокализации (всплески, скрипы и т.п.), но и акустический фон от моторных плавсредтв и дальнего судоходства, сопровождающий тюленей в естественной среде.

Реакция животных на акустическое воздействие оценивалась путем визуального наблюдения и анализа видеозаписей. В ходе экспериментов у большинства животных зарегистрирована доля ответной реакции на акустическое воздействие более 70% (рис. 2).

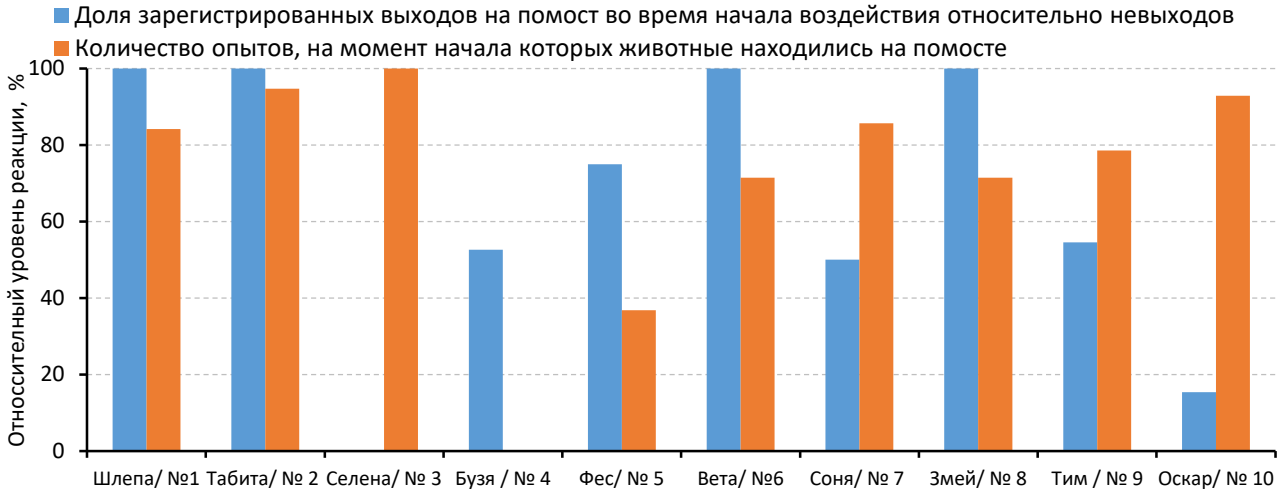


Рис. 2. Нормированный уровень ответных реакций животных на акустическое воздействие

Ответная реакция в виде увеличения активности под водой в 100% случаев проявлялась у двух особей, в то время как другие животные примерно поровну реагировали выходом из воды помост, большей скоростью и сменой траекторий плавания. Выход на помост как преобладающий ответ (85% от всех реакций) наблюдался лишь у одного тюленя.

6 Обсуждение результатов и выводы

Обработка экспериментальных данных показала, что акустическое воздействие на животных вызывает хорошо выраженные поведенческие реакции со значительной вариативностью индивидуальных ответов на раздражители. Кроме того, наблюдается влияние возраста животных и продолжительности их содержания в условиях неволи на характер ответных

реакций, поскольку более взрослые особи имеют менее выраженные реакции, а в некоторых случаях в ходе эксперимента наблюдалось снижение интенсивности поведенческих ответов.

Исследования показали, что решение задач экологического мониторинга и оценки влияния увеличения антропогенной нагрузки на морские экосистемы возможно при поэтапном системном подходе, не смотря на междисциплинарный характер и необходимость соблюдения этических аспектов обращения с дикими животными. Результаты работы подтверждают возможность проведения при определенных условиях исследований одновременно с мониторингом шумового загрязнения акваторий.

Авторы выражают благодарность руководителю Центра гидроакустики, заместителю директора ИПФ РАН П.И. Коротину, заведующему отделом акустики океана Д.А. Касьянову и заместителю директора ММБИ РАН Д.В. Моисееву за помощь в организации и проведении исследований. Работа проведена в рамках выполнения государственных заданий ИПФ РАН (проекты FFUF-2024-0040, FFUF-2024-0041), а также ММБИ РАН (FMEE-2024-0015).

Список литературы

1. *Kuşku H., Yiğit M., Ergün S., Yiğit Ü., Taylor N.* Acoustic noise pollution from marine industrial activities: Exposure and impacts. // Aquatic Research. 2018. **1,** N 4. P. 148-161.

2. *Andrew R.K., Howe B.M., Mercer J.A., Dzieciuch M.A.* Ocean ambient sound: Comparing the 1960s with the 1990s for a receiver off the California coast. // Acoustics Research Letters Online. 2002. **3**, N 2. P. 65-70.

3. *Prawirasasra M. S., Mustonen M., Klauson A.* Underwater monitoring of pinniped vocalizations in the Gulf of Riga // Proc. Mtgs. Acoust. 2019. **37**, N1. P. 070015.

4. *Todd V., Todd I., Gardiner J.* [at al.]. A review of impacts of marine dredging activities on marine mammals // ICES J. of Marine Science. 2015. **72**, N 2. P. 328-340.

5. *Asselin S., Hammil M.O., Barrette C.* Underwater vocalizations of ice breeding grey seals // Can. J. Zool. 1993. **71.** P. 2211-2219.

6. *Hocking D.P., Burville B., Parker W.M.G., et al.* Percussive underwater signaling in wild gray seals // Marine Mamm. Sci. 2020. **36**, N 2. P. 728-732.

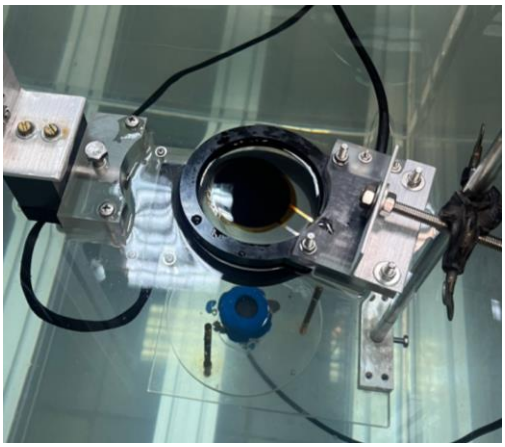
7. *Stansbury A.L., Janik V.M.* The role of vocal learning in call acquisition of wild grey seal pups// Philos. Trans. R. Soc. B. 2021. **376**, N 1836. P. 1-6.

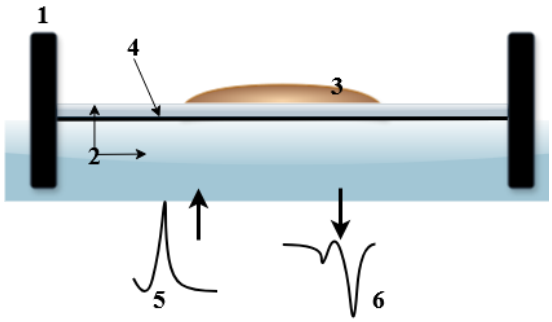
8. *Hildebrand J.A.* Anthropogenic and natural sources of ambient noise in the ocean // Marine Ecology Progress Series. 2009. **395**. P. 5-20.

9. *Бритенков А.К., Норкин М.С., Стуленков А.В., Травин Р.В.* Исследование электроакустических характеристик компактного 3D НЧИ – низкочастотного гидроакустического преобразователя продольно-изгибного типа сложной формы // Научное приборостроение. 2023. **33**, № 4. С. 28-39.

Назад к содержанию секции

СЕКЦИЯ НЕЛИНЕЙНАЯ АКУСТИКА





назад к Содержанию

СОДЕРЖАНИЕ СЕКЦИИ НЕЛИНЕЙНАЯ АКУСТИКА

1. МОДЕЛЬ УРАВНЕНИЯ БЮРГЕРСА В НЕЛИНЕЙНОЙ АКУСТИКЕ И ЕЕ ДАЛЬНЕЙШЕЕ РАЗВИТИЕ
Гусев В.А. 1470

2. ВЛИЯНИЕ РЕЛАКСАЦИИ МАТЕРИАЛА НА НЕЛИНЕЙНЫЕ ПРОДОЛЬНЫЕ ПРОСТРАНСТВЕННО ЛОКАЛИЗОВАННЫЕ ВОЛНЫ ДЕФОРМАЦИИ, РАСПРОСТРАНЯЮЩИЕСЯ В ПОВРЕЖДЕННОМ СТЕРЖНЕ БИШОПА, ПОМЕЩЕННОМ В МАГНИТНОЕ ПОЛЕ
Леонтьева А.В. 1477

3. БЕСКОНТАКТНАЯ ДИАГНОСТИКА ПЛЁНОК НА ПОВЕРХНОСТИ ЖИДКОСТИ МЕТОДАМИ НЕЛИНЕЙНОЙ АКУСТИКИ
Зимина К.Д., Бахтин В.К., Дерябин М.С., Касьянов Д.А., Прохоров А.А. 1483

4. ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС С ГРАФИЧЕСКИМ ИНТЕРФЕЙСОМ ДЛЯ СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА РАЗЛИЧНЫХ ВРЕМЕННЫХ АЛГОРИТМОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ УРАВНЕНИЯ БЮРГЕРСА
Квашенникова А.В., Сергеева М.С., Хохлова В.А. 1489

5. ГЕНЕРАЦИЯ ПОЛЯ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ В ВОЛНОВОДЕ СО ВСТАВКОЙ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ
Комаровский К.О., Гусев В.А. 1491

6. GPU-РЕАЛИЗАЦИЯ ЧИСЛЕННОЙ СХЕМЫ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ ВЕСТЕРВЕЛЬТА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИНТЕНСИВНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПУЧКОВ В УДАРНО-ВОЛНОВЫХ РЕЖИМАХ
Коннова Е.О., Хохлова В.А., Юлдашев П.В. 1497

7. АКУСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛИНЕЙНЫХ ВЯЗКОУПРУГИХ СРЕД С ПАМЯТЬЮ: ОТСУТСТВИЕ ДИСПЕРСИОННОГО СООТНОШЕНИЯ И ЗАПРЕТ УДАРНЫХ ВОЛН
Приказчиков Д.А., Петров И.Б. 1499

8. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛНОГО НЕЛИНЕЙНОГО ВОЛНОВОГО УРАВНЕНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ГЕНЕРАЦИИ ВОЛНЫ РАЗНОСТНОЙ ЧАСТОТЫ ФОКУСИРУЮЩИМ БИГАРМОНИЧЕСКИМ ИЗЛУЧАТЕЛЕМ
Сергеева М.С., Квашенникова А.В., Юлдашев П.В., Хохлова В.А. 1505

9. МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВЫХ РЕЖИМОВ ФОКУСИРОВКИ УЛЬТРАЗВУКА 128-ЭЛЕМЕНТНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЁТКОЙ В ВОЗДУХЕ
Юлдашев П., Лапина А.В., Цысарь С.А., Сапожников О.А. 1511

УДК: 534.222 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39732

Модель уравнения Бюргерса в нелинейной акустике и ее дальнейшее развитие

В.А. Гусев[1,a]

[1] *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, 119991 Россия*
E-mail: [a]vgusev@bk.ru

Уравнение Бюргерса (УБ) – одно из базовых уравнений нелинейной акустики. Его особое положение связано, в частности, с тем, что это одно из немногих нелинейных уравнений, имеющих точное общее решение. Приведен обзор классических точных решений УБ, а также методов построения его точных и асимптотических решений. Рассмотрены взаимосвязи между различными решениями. Особое внимание уделено ограничениям, возникающим при использовании точных решений. Показано, что ключевую роль при построении физически осмысленных решений играет не точное удовлетворение уравнению, а асимптотическое поведение. В частности, отмечено, что решение Хохлова носит асимптотический характер. Уточнены критерии, разделяющие квазилинейный и нелинейный режимы. Предложен новый критерий, определяющий динамику поведения на больших расстояниях на основе уравнения движения ударного фронта. Полученные результаты применены для анализа обобщенного уравнения Бюргерса (ОУБ) с переменной вязкостью. Построено точное решение ОУБ с линейной зависимостью вязкости в виде скачка конечной ширины. На его основе построены решения ОУБ для синусоидального и импульсного сигналов. Поправка к ширине ударного фронта, найденная из точного решения ОУБ с линейной зависимостью вязкости, позволила добиться хорошего согласия асимптотического и численного решений. Показано, что данное уточненное выражение для ширины ударного фронта пригодно для описания профиля волн и с произвольной зависимостью переменной вязкости от расстояния.

Ключевые слова: обобщенное уравнение Бюргерса, решение Хохлова, автомодельное решение, ударный фронт

PACS: 43.20.Bi, 43.25.+y.

The Burgers equation model in nonlinear acoustics and its further development

V.A. Gusev[1,a]

[1] *Department of Acoustics, Faculty of Physics, M.V.Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia.*
E-mail: [a]vgusev@bk.ru

The Burgers equation (BE) is one of the fundamental equations of nonlinear acoustics. Its special position is due, in particular, to the fact that it is one of the few nonlinear equations with an exact

general solution. This paper provides an overview of classical exact solutions of the BE, as well as methods for constructing its exact and asymptotic solutions. The relationships between different solutions are considered. Particular attention is given to the limitations that arise when using exact solutions. It is shown that the key role in constructing physically meaningful solutions lies not in the exact satisfaction of the equation, but in the asymptotic behavior. In particular, it is noted that Khokhlov's solution is asymptotic in nature. The criteria separating the quasilinear and nonlinear regimes are refined. A new criterion is proposed that determines the dynamics of behavior at large distances based on the equation of shock front motion. The obtained results are applied to the analysis of the generalized Burgers equation (GBE) with variable viscosity. An exact solution to the OBE equation with a linear viscosity dependence in the form of a finite-width jump is constructed. Based on this, OBE solutions for sinusoidal and pulsed signals are constructed. A correction to the shock front width, found from the exact OBE solution with a linear viscosity dependence, allowed for good agreement between the asymptotic and numerical solutions. This refined expression for the shock front width is shown to be suitable for describing wave profiles with arbitrary distance dependences of the viscosity variable.

Keywords: generalized Burgers equation, Khokhlov solution, self-similar solution, shock front
PACS: 43.20.Bi, 43.25.+y.
Received

Введение

Уравнение Бюргерса (УБ) – одно из базовых уравнений нелинейной акустики [1]. Оно описывает распространение интенсивных акустических волн при учете эффектов нелинейности и вязкой диссипации. Учет диссипации является принципиальным при построении временных профилей для правильного описания структуры ударного фронта.

В безразмерных переменных УБ имеет вид:

$$\frac{\partial V}{\partial s} - V\frac{\partial V}{\partial \theta} = \Gamma\frac{\partial^2 V}{\partial \theta^2}, \tag{1}$$

где V – колебательная скорость, s – расстояние, θ – время, параметр Γ характеризует относительную роль диссипативных и нелинейных эффектов.

Под обобщенным уравнением Бюргерса (ОУБ) в данной работе понимается уравнение Бюргерса с переменным коэффициентом вязкости [1]:

$$\frac{\partial V}{\partial s} - V\frac{\partial V}{\partial \theta} = \Gamma(s)\frac{\partial^2 V}{\partial \theta^2}. \tag{2}$$

ОУБ (2) возникает в ряде важных задач нелинейной акустики. Отметим среди них акустические волны в стратифицированной атмосфере [2], нелинейные акустические пучки [1] и волны в узких трубках переменного сечения [3].

Как известно, атмосфера Земли является вертикально стратифицированной средой, равновесная плотность которой экспоненциально убывает с высотой (в рамках изотермической модели). Это приводит к экспоненциальному росту колебательной скорости. Таким образом, даже для малых начальных амплитуд необходимо учитывать нелинейные эффекты при распространении на большие высоты. При этом в эффективных переменных получается ОУБ с линейной зависимостью коэффициента вязкости [2]:

$$\frac{\partial V}{\partial s} - V\frac{\partial V}{\partial \theta} = \Gamma\left(1 + s/s_0\right)\frac{\partial^2 V}{\partial \theta^2}. \qquad (3)$$

В рамках модели с линейной зависимостью температуры от высоты можно получить ОУБ более общего типа со степенной зависимостью коэффициента вязкости.

Для нелинейных ограниченных пучков вдали от областей фокусировки справедливо приближение нелинейной геометрической акустики (НГА), которое сводится к двум уравнениям – уравнению эйконала и уравнению переноса. Уравнение эйконала определяет структуру лучей, на основе которой можно ввести лучевые координаты. После перехода к лучевым координатам уравнение переноса сводится к ОУБ вдоль заданного луча, а лучевые координаты нумеруют эти лучи. Таким образом, в приближении НГА поле трехмерного пучка можно описать одномерным уравнением, параметрами которого являются поперечные лучевые координаты, а переменный коэффициент вязкости связан с текущей площадью поперечного сечения лучевой трубки. Близкое по структуре ОУБ получается и при распространении волн в трубках переменного сечения; при этом, вообще говоря, конкретный вид и структура уравнения, вид диссипативного слагаемого зависят от используемых переменных и исходной постановки задачи [3].

Асимптотический характер классических решений уравнения Бюргерса

Особое внимание к УБ связано с тем, что это одно из немногих нелинейных уравнений, имеющих общее точное решение. Подстановкой Хопфа-Коула

$$V = 2\Gamma\frac{\partial}{\partial \theta}\ln U \qquad (4)$$

оно сводится к уравнению теплопроводности

$$\frac{\partial U}{\partial s} = \Gamma\frac{\partial^2 U}{\partial \theta^2} \qquad (5)$$

с начальным условием $U_0 = \exp\left(\int \frac{V_0(\theta)}{2\Gamma} d\theta\right)$, что позволяет построить точное решение УБ в интегральном виде [1]. Однако, полученное точное решение неудобно для анализа. Даже для исходного синусоидального профиля решение уравнения (5) для вспомогательной функции U задается в виде ряда, а для V согласно (4) получается отношение рядов [1]. В наиболее интересной области развитых ударных фронтов малой толщины использование этого решения затруднительно. При малых $\Gamma < 0.1$ построение графика аналитического решения возможно на компьютере, но из-за вычисления входящих в ряд функций Инфельда большого аргумента оно эквивалентно по трудоемкости непосредственному численному решению УБ. При больших $\Gamma > 0.1$ использование точного решения является чрезмерным, и хорошо работает асимптотическое решение, полученное методом возмущений для малых нелинейных слагаемых УБ (1). Одним из результатов анализа этих асимптотических решений является пороговое значение $\Gamma \sim 0.1$, разделяющее квазилинейный и нелинейный режимы распространения волны. Интересно, что это пороговое значение имеет близкие значения для двух противоположных ситуаций – исходных синусоидального сигнала (предельно узкий спектр) и импульсного в виде дельта-функции (предельно широкий спектр).

С другой стороны, в области развитых ударных фронтов оказываются удобными приближенные выражения – решения Фэя и Хохлова. Решение Хохлова [1]

$$V = -\frac{\theta}{1+s} + \frac{1}{1+s}\,\mathrm{th}\,\frac{\theta}{2\Gamma(1+s)} \qquad (6)$$

изначально было угадано в результате объединения решения в виде N-волны вне ударного фронта и стационарного скачка для описания ударного фронта. Удивительным образом оказалось, что выражение (6) является точным решением УБ (1).

Однако более строгий анализ показывает, что выражение (6), формально являясь точным решением УБ, является только его приближенным решением для исходного синусоидального профиля, для которого оно и вначале и угадывалось. Для того чтобы убедиться в этом, достаточно построить графики решения (6) (см. рис. 1). Во-первых, заметим, что для исходного синусоидального профиля используется не все выражение (6), а его часть в интервале $-\pi < \theta < \pi$, которая затем периодически продолжается. Кроме того, при $z = 0$ оно не сводится к исходному синусоидальному профилю. Это уже наталкивает на мысль, что выражение (6) – приближенное решение.

На рис. 1 приведены графики решения (6) для двух значений параметра $\Gamma = 0.01$ и $\Gamma = 0.5$ на различных расстояниях. Видно, что при $\Gamma = 0.01$ профиль действительно имеет вид сглаженной N-волны. При $\Gamma = 0.5$, когда согласно вышесказанному реализуется

квазилинейный режим, поведение решения (6) не соответствует динамике исходного профиля: сдвигаются нулевые точки, чего не должно происходить, профиль меняет полярность и все дальше уходит от синусоидального вида.

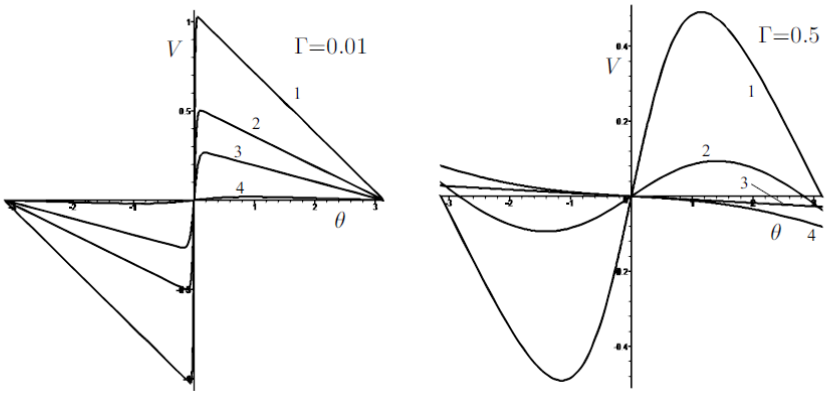


Рис. 1. Решение Хохлова (6) для значений параметра $\Gamma = 0.01$ и $\Gamma = 0.5$. Номера кривых 1–4 соответствуют расстояниям z = 2, 5, 10, 100.

Решение Хохлова может быть строго получено методом сращиваемых асимптотических разложений и является первым членом асимптотического ряда при $\Gamma \to 0$. При этом следующие члены имеют порядок не выше Γ и фактически несущественны при построении профиля, но исправляют сдвиг нулевых точек, присутствующий в выражении (7). Кроме того, анализ области применимости асимптотического разложения указывает на расстояние $z \sim 1/\Gamma$ как границу применимости решения Хохлова; далее волна выходит на линейную стадию. Таким образом, решением Хохлова правильно называть функцию

$$V = -\frac{\theta}{1+s} + \frac{1}{1+s}\,\mathrm{th}\,\frac{\theta}{2\Gamma(1+s)},\ -\pi < \theta < \pi,\ \Gamma < 0.1,\ 2 < z \le \frac{1}{\Gamma}, \qquad (7)$$

далее периодически продолжаемую. Отметим также, что решение Фэя является рядом Фурье для решения Хохлова, но только в области применимости решения Хохлова, т.е. до $z \sim 1/\Gamma$.

Таким образом, теория УБ строится во многом на представлении о построении точных решений, их преобразованиях и их анализе. Это существенно затрудняет перенос известных подходов для решения ОУБ (2), для которого не удается найти линеаризующую подстановку или точное общее решение, а класс точных решений весьма ограничен. С другой стороны, как показано выше, основной физический смысл имеют приближенные решения, построение которых не связано напрямую с нахождением точных решений. Насколько эффективны эти приближенные методы будут для решения ОУБ?

Асимптотическое решение обобщенного уравнения Бюргерса

Оказывается, что построение асимптотического решения уравнения (2) при $\Gamma \to 0$ имеет примерно ту же точность, что и решение Хохлова для УБ (1). А именно, используем метод сращиваемых асимптотических разложений. В области вне ударного фронта находим

решение в виде пилообразной волны. В области ударного фронта растягиваем координаты и находим решение в виде скачка конечной ширины. После сращивания решений, получаем аналог решения Хохлова для ОУБ (3):

$$V = -\frac{\theta}{1+s} + \frac{1}{1+s}\,\mathrm{th}\,\frac{\theta}{2\Gamma(1+s)(1+s/s_0)}. \qquad (8)$$

На больших расстояниях это решение накапливает ошибку. Его удается улучшить, подставив выражение для ударного фронта, найденное из автомодельного решения уравнения (3), описывающего скачок конечной ширины. Точное выражение задается в квадратурах, а приближенное выражение вблизи середины ударного фронта имеет вид:

$$V_0(x) = A\,\mathrm{th}\left[\frac{A}{4}\left(1+\sqrt{1+\frac{8\Gamma(1+s)}{A^2}}\right)\frac{\theta}{\Gamma(1+s/s_0)}\right], \qquad (9)$$

где A – амплитуда скачка. В итоге получаем улучшенное решение типа Хохлова

$$V = -\frac{\theta}{1+s} + \frac{1}{1+s}\,\mathrm{th}\left[\left(1+\sqrt{1+\frac{8\Gamma(1+s)^2}{\pi s_0^2}}\right)\frac{\theta}{4\Gamma(1+s)(1+s/s_0)}\right]. \qquad (10)$$

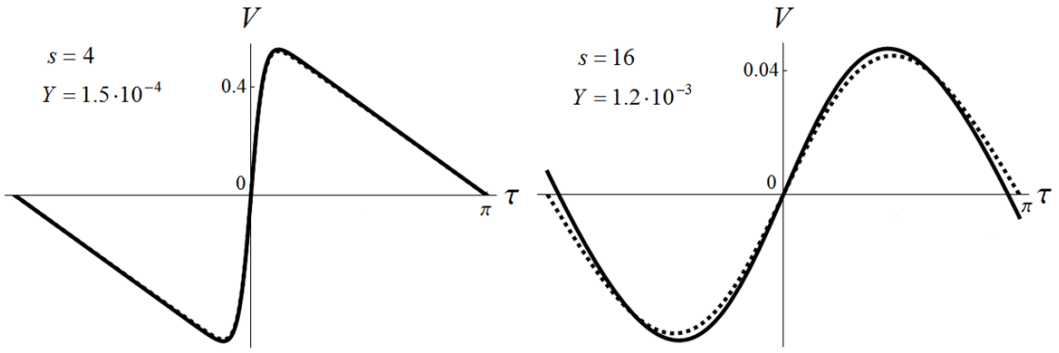


Рис. 2. Сравнение временных профилей исходного синусоидального сигнала на двух расстояниях (s = 4 и s = 16), построенных по улучшенной формуле (6) (сплошные линии) и по численному решению ОУБ (3) (штриховые линии).

На рис. 2 представлено сравнение временных профилей исходного синусоидального сигнала, построенных по улучшенной формуле (10) и найденных численным расчетом ОУБ (3). Как видно, совпадение достаточно хорошее для расстояний вплоть до границы выхода на линейную стадию (в данном случае как раз $s \sim 16$), когда асимптотическое решение типа (10) перестает работать.

Анализ структуры асимптотического решения показывает, что улучшенное выражение для ударного фронта может быть применено и для уравнения с произвольной зависимостью коэффициента вязкости от расстояния. В этом случае нужно только следить за областью применимости самого асимптотического разложения.

Эта задача приводит к формулировке нового критерия выхода волны на линейную

стадию в рамках ОУБ. Эволюция волны определяется двумя факторами – укручением волны за счет нелинейности и расплывания за счет вязкости. Как только вязкое расплывание начинает превышать смещение ударного фронта за счет нелинейности, начинается линейная стадия распространения. Ширина ударного фронта определяется преимущественно выражением $\Delta\theta = \Gamma(s)(1+s)$. Среднюю скорость движения ударного фронта можно найти из уравнения $\frac{d\langle\theta\rangle}{ds} = -\frac{V_{\min}+V_{\max}}{2}$, где задаются значения на экстремумах профиле перед и после ударного фронта. Это выражение обобщает известное выражение для скорости ударной волны в профиле простой (римановой волны) $\frac{d\theta_{sh}}{ds} = -\frac{V_1+V_2}{2}$, где $V_{1,2}$ – амплитуды на разрыве [1]. Для выхода на линейную стадию должно выполняться соотношение $\langle\theta\rangle/\Delta\theta \to 0$. Отсюда можно определить характерное расстояние выхода волны на линейную стадию.

Заключение

Таким образом, в работе показано, что классические решения уравнения Бюргерса, имеющие конкретный физический смысл, носят асимптотический характер. Это позволяет распространить методику их построения на решение обобщенного уравнения Бюргерса с произвольной зависимостью коэффициента вязкости. В частности, получена поправка к ширине ударного фронта, позволяющая построить аналитическое выражение для профиля волны с достаточной точностью. Предложена схема построения асимптотического решения для произвольной зависимости коэффициента вязкости от расстояния. Предложен новый критерий выходы волны на линейную стадию, основанный на сопоставлении нелинейного сдвига ударного фронта и его диссипативного расплывания.

Список литературы

1. *Руденко О.В.* Нелинейная акустика. М.: Издательство Московского университета, 2025.

2. *Гусев В.А., Жостков Р.А.* Трансформация интенсивных акустических волн, распространяющихся вертикально вверх в изотермической стратифицированной атмосфере // Изв. Рос. Акад. наук. Физ. атмосферы и океана. 2015. Т. **51**. № 5. С. 587-597.

3. *Gusev V.A., Komarovskii K.O.* Dissipative Effects in the Propagation of Linear Waves in Narrow Tubes of Variable Cross Section // Physics of Wave Phenomena. 2025. V. **33**. № 5. P. 361-367.

УДК: 534.1, 539.3 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39733

Влияние релаксации материала на нелинейные продольные пространственно локализованные волны деформации, распространяющиеся в поврежденном стержне Бишопа, помещенном в магнитное поле

А.В. Леонтьева

Институт проблем машиностроения РАН – филиал ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук». 603024, г. Нижний Новгород, ул. Белинского, д. 85

E-mail: aleonav@mail.ru

Аннотация: В работе изучается распространение плоских продольных волн в однородном, нелинейно-упругом стержне (модель Бишопа), находящемся во внешнем нестационарном магнитном поле; при этом принимается наличие поврежденности в материале стержня. Исходная система уравнений рассматривается в общем случае. При некоторых соотношениях между параметрами (в частности, при больших временах релаксации), система сводится к уравнению ангармонического осциллятора с двумя типами квадратичной нелинейности. Найден первый интеграл уравнения. Качественный анализ показал возможность распространения в системе волн деформации: нелинейных периодических и пространственно локализованных солитонного типа.

Ключевые слова: продольная волна, нелинейно-упругий стержень Бишопа, поврежденность материала, магнитное поле, нелинейный осциллятор, солитон деформации

Influence of material relaxation on nonlinear longitudinal spatially localized strain waves propagating in a damaged Bishop rod placed in a magnetic field

A.V. Leonteva

Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences – Branch of Federal Research Center "Institute of Applied Physics n.a. A.V. Gaponov–Grekhov of the RAS". Nizhny Novgorod 603024, Russia

E-mail: aleonav@mail.ru

Abstract: This paper studies the propagation of plane longitudinal waves in a homogeneous, nonlinearly elastic rod (Bishop model) located in an external non-stationary magnetic field.

The rod material is assumed to contain damage. The initial system of equations is considered in the general case. With some relationships between parameters (in particular, with large relaxation times), the system reduces to the equation of an anharmonic oscillator with two types of quadratic nonlinearity. The first integral of the equation is found. A qualitative analysis demonstrates the possibility of propagation of strain waves in the system: nonlinear periodic ones and spatially localized soliton-type ones.

Keywords: longitudinal wave, nonlinear elastic Bishop rod, material damage, magnetic field, nonlinear oscillator, strain soliton

PACS: 43.25.Dc, 05.45

Введение

Изучением процессов накопления повреждений занимается механика поврежденной среды, интенсивно развивающаяся в последнее время.

Фундаментальные положения механики поврежденной среды были впервые изложены в конце 50-х и 60-х гг. в работах, соответственно, Л.М. Качанова, Ю.Н. Работнова и А.А. Ильюшина. В дальнейшем ими в работах [1–3] были изложены основы математических теорий. На базе этих теорий математические модели развиваются до сих пор.

Процессы накопления повреждений представляют начальную стадию процессов разрушения материала, за которыми следуют процессы возникновения и распространения макроскопических трещин в материале, ведущие к полному разрушению (разделению на части) материала.

К повреждениям, рассеянным по объему материала, относятся внутренние дефекты материалов – микродефекты, такие как микропоры и микротрещины.

1 Постановка задачи

Система уравнений включает в себя уравнение динамики стержня (модель Бишопа), уравнение изменения напряженности внешнего магнитного поля и кинетическое уравнение накопления повреждений в материале стержня:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - c_0^2\left(1+\frac{\alpha_0}{E}\frac{\partial u}{\partial x}\right)\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \nu^2 R^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2}\left(\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - c_\tau^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}\right) + \frac{H_0}{4\pi\rho}\frac{\partial h}{\partial x} - \beta_1 \frac{\partial \psi}{\partial x} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + H_0 \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} - \frac{c^2}{4\pi\sigma}\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} + \alpha\psi - \beta_2 E \frac{\partial u}{\partial x} = 0, \quad (3)$$

где $u(x,t)$ – перемещение частиц на срединной линии стержня, $h(x,t)$ – напряженность магнитного поля, $\psi(x,t)$ – скалярная функция, характеризующая относительную плотность равномерно рассеянных в единице объема микродефектов, $c_0 = \sqrt{E/\rho}$ – скорость распространения продольной волны в отсутствие магнитного поля, E – модуль Юнга, ρ – плотность материала, α_0 – коэффициент нелинейной упругости ($\alpha_0 < 0$ для большинства металлов и сплавов, $\alpha_0 > 0$ для многих композитов), ν – коэффициент Пуассона ($0 \le \nu \le 1/2$, для большинства сплавов и металлов $0,25 \le \nu \le 0,35$), $R = \sqrt{I_0/F}$ – полярный радиус инерции, I_0 – полярный момент инерции сечения, F – площадь поперечного сечения стержня, $c_\tau = \sqrt{\mu/\rho}$ – скорость распространения сдвиговых волн, μ – константа Ламе, H_0 – напряженность внешнего магнитного поля, c – скорость света в вакууме, σ – электрическая проводимость материала стержня, $\alpha = 1/\tau_*$, β_1, β_2 – постоянные параметры, характеризующие поврежденность материала и связь циклических процессов с процессами накопления повреждений, τ_* – время релаксации.

В системе (1)–(3) учтено, что суммарное магнитное поле состоит из его постоянного значения и возмущений, появляющихся в результате взаимодействия с полем деформаций:

$$\mathbf{H} = H_0\mathbf{n} + \mathbf{h},$$

где $\mathbf{n}$ – вектор нормали, $\mathbf{h}$ – малое возмущение магнитного поля. Считается также, что внешнее постоянное магнитное поле с напряженностью H_0 перпендикулярно направлению распространения волны. В этом случае для продольных волн в стержне выполняются соотношения:

$$\mathbf{u} = (u_1, 0, 0) \equiv u(x,t),\ \mathbf{h} = (0, 0, h_3) \equiv h(x,t),\ \mathbf{H} = (0, 0, H_0 + h).$$

Задача (1)–(3) предполагает дополнительное исследование двух предельных случаев [4]. В одном случае принимается усеченная связь между напряженностью магнитного поля и перемещением, в другом случае, электрическая проводимость материала считается бесконечной величиной.

2 Качественный анализ уравнения ангармонического осциллятора

Если уравнение изменения напряженности внешнего магнитного поля рассматривать целиком, то из системы (1)–(3) следует уравнение относительно продольного смещения

$$
\begin{aligned}
&m_{13}\frac{\partial^3 U}{\partial\tau^3}-m_{13}\left(1+m_{12}+m_2\right)\frac{\partial^3 U}{\partial z^2\partial\tau}-\left(1+m_{11}+m_{13}\right)\frac{\partial^4 U}{\partial z^2\partial\tau^2}+\left(1+m_2\right)\frac{\partial^4 U}{\partial z^4}+m_{13}\frac{\partial^4 U}{\partial\tau^4}-\\
&-\left(1+m_{13}m_3\right)\frac{\partial^5 U}{\partial z^2\partial\tau^3}+\left(1+m_{13}m_3m_4\right)\frac{\partial^5 U}{\partial z^4\partial\tau}-m_{13}m_3\frac{\partial^6 U}{\partial z^2\partial\tau^4}+m_3\left(1+m_{13}m_4\right)\frac{\partial^6 U}{\partial z^4\partial\tau^2}-\\
&-m_3m_4\frac{\partial^6 U}{\partial z^6}+m_3\frac{\partial^7 U}{\partial z^4\partial\tau^3}-m_3m_4\frac{\partial^7 U}{\partial z^6\partial\tau}-m_{13}m_5\frac{\partial}{\partial\tau}\left(\frac{\partial U}{\partial z}\frac{\partial^2 U}{\partial z^2}\right)-m_{13}m_5\frac{\partial^2}{\partial\tau^2}\left(\frac{\partial U}{\partial z}\frac{\partial^2 U}{\partial z^2}\right)+\\
&+m_5\frac{\partial^2}{\partial z^2}\left(\frac{\partial U}{\partial z}\frac{\partial^2 U}{\partial z^2}\right)+m_5\frac{\partial^3}{\partial z^2\partial\tau}\left(\frac{\partial U}{\partial z}\frac{\partial^2 U}{\partial z^2}\right)=0
\end{aligned}
\qquad (4)
$$

где через $U=u/u_0$, $z=x/X$, $\tau=t/T$ обозначены безразмерные переменные перемещения, координаты и времени, а характерные величины длины и времени считаются равными $T=1/\alpha$, $X=c_0/\alpha$.

Параметры задачи объединены в безразмерные комплексы

$$
m_{11}=\frac{H_0^2\sigma}{c^2\rho\alpha},\ m_{12}=\frac{H_0^2}{4\pi\rho c_0^2},\ m_{13}=\frac{4\pi\sigma c_0^2}{\alpha c^2},\ m_2=\frac{\beta_1\beta_2 E}{\alpha c_0^2},\ m_3=\frac{\alpha^2\nu^2R^2}{c_0^2},\ m_4=\frac{c_\tau^2}{c_0^2},\ m_5=\frac{\alpha_0u_0\alpha}{c_0E},
$$

где m_{11}, m_{12}, m_{13} характеризуют напряженность поля и проводимость материала ($m_{11}>0$, $0<m_{12}<1$, $m_{13}>0$; $m_{12}m_{13}/m_{11}=1$, $m_{12}=c_a^2/c_0^2$, где $c_a=H_0/\sqrt{4\pi\rho}$ – скорость волны Альфвена, $c_a/c_0<<1$), m_2 – поврежденность материала (параметр поврежденности, из физических соображений следует, что $-1\le m_2\le1$, его знак зависит от знаков величин β_1, β_2), m_3 – релаксацию материала ($m_3>0$), m_4 – упругие свойства материала ($1/3\le m_4\le1/2$, поскольку $\mu/E=1/2(1+\nu)$), m_5 – нелинейную упругость материала ($m_5<0$).

Уравнение (4) не является волновым. В переменных стационарной волны ($U(z,\tau)=U(\theta)$, $\theta=z-v\tau$) уравнение (4) запишется в виде

$$
\begin{aligned}
&-m_3v\left(m_4-v^2\right)\frac{\mathrm{d}^4W}{\mathrm{d}\theta^4}+m_3\left(m_4-v^2\right)\left(1-m_{13}v^2\right)\frac{\mathrm{d}^3W}{\mathrm{d}\theta^3}+v\left(1-v^2+m_{13}m_3\left(m_4-v^2\right)\right)\frac{\mathrm{d}^2W}{\mathrm{d}\theta^2}-\\
&-\left(\left(1-v^2\right)\left(1-m_{13}v^2\right)+m_2-m_{11}v^2\right)\frac{\mathrm{d}W}{\mathrm{d}\theta}-m_{13}v\left(1-v^2+m_{12}+m_2\right)W-\\
&-\frac{1}{2}m_{13}m_5vW^2-m_5\left(1-m_{13}v^2\right)W\frac{\mathrm{d}W}{\mathrm{d}\theta}+\frac{1}{2}m_5v\frac{\mathrm{d}^2}{\mathrm{d}\theta^2}\left(W^2\right)=0
\end{aligned}
\qquad (5)
$$

где $W(\theta)=\mathrm{d}U/\mathrm{d}\theta$ можно считать продольной деформацией вдоль направления θ.

При $m_3\to0$, $m_2\to m_{12}$ и $v^2\to1/m_{13}$, уравнение (5) сводится к уравнению ангармонического осциллятора с двумя типами квадратичной нелинейности

$$
W''-\left(1-\frac{2m_{12}m_{13}}{1-m_{13}}\right)m_{13}W+\frac{m_5m_{13}^2}{2\left(1-m_{13}\right)}W^2-\frac{m_5m_{13}}{2\left(1-m_{13}\right)}\left(W^2\right)''=0,
\qquad (6)
$$

допускающему качественное исследование.

Случай $m_3 \to 0$ соответствует либо упрощенной модели стержня (модели Бернулли), либо большим временам релаксации материала поврежденного стержня Бишопа.

Первый интеграл уравнения (6)

$$\left(\frac{\mathrm{d}W}{\mathrm{d}\theta}\right)^2 = \frac{-\left(d_2 d_3/2\right)W^4 - \left(d_2/3 + 2d_1 d_3/3\right)W^3 - \left(d_1/2\right)W^2 + C_0}{\left(1+2d_3 W\right)^2/2},$$

где C_0 – константа интегрирования, d_i – коэффициенты уравнения

$$d_1 = -\left(1 - \frac{2m_{12}m_{13}}{1-m_{13}}\right)m_{13},\ d_2 = \frac{m_5 m_{13}^2}{2\left(1-m_{13}\right)},\ d_3 = -\frac{m_5 m_{13}}{2\left(1-m_{13}\right)}.$$

Кривые первого (вертикальная прямая) и второго (гипербола) порядков

$$W - \frac{1-m_{13}}{m_5 m_{13}} = 0, \tag{7}$$

$$\left(W_0\right)^2 - \frac{1}{4}m_{13}\left[W + \frac{1-m_{13}}{3m_5 m_{13}}\left(1 - 4\left(1 - \frac{2m_{12}m_{13}}{1-m_{13}}\right)\right)\right]^2 = \frac{2m_{12}^2 m_{13}}{9m_5^2}\left(1 - 9\left(1 - \frac{1-m_{13}}{2m_{12}m_{13}}\right)^2\right) \tag{8}$$

делят фазовое пространство на области с различным типом траекторий, их взаимное расположение на плоскости $\left(W, W_0\right)$ определяет существование и качество замкнутых траекторий. Кривая (8) не является областью запрещенных движений, но при наличии точек пересечения с асимптотой (7), принимает такой характер. Ситуация с эллипсом (8) в данной задаче невозможна, но встречается в другой задаче и рассматривается в работе [5].

В системе, описываемой уравнением (6), два состояния равновесия:

$$W = 0,\ W = \frac{2}{m_5 m_{13}}\left(1 - m_{13} - 2m_{12}m_{13}\right),$$

из которых одно неустойчиво (особая точка типа «седло»), другое устойчиво (особая точка типа «центр»), либо оба состояния неустойчивы (особые точки типа «седло»). Судя по собственным числам матрицы Якоби, тип особой точки, соответствующей каждому из этих состояний, зависит от значений параметров m_{12}, m_{13}.

Если ветви гиперболы (8) расположены вдоль горизонтальной оси и прямая (7) пересекает одну ветвь гиперболы, то на фазовой плоскости присутствуют изолированные траектории, заключенные областями запрещенных движений, как и в случае, если гипербола вырождается в пару прямых, которые пересекаются вертикальной асимптотой.

Если ветви гиперболы (8) расположены вдоль горизонтальной оси и прямая (7) не пересекает ни одной ветви гиперболы, то замкнутые траектории на фазовой плоскости отсутствуют.

Если ветви гиперболы (8) расположены вдоль вертикальной оси, то прямая (7) пересекает обе ветви гиперболы и на фазовой плоскости присутствуют замкнутые концентрические траектории, ограниченные сепаратрисной петлей, разделяющей области финитных и инфинитных движений. Траектории, расположенные вблизи центра, соответствуют периодическим квазигармоническим волнам; траектории движения, находящиеся вблизи сепаратрисы, – кноидальным волнам; траектории, лежащие на сепаратрисе, – локализованным волнам или солитонам.

Заключение

В работе показано, что модель стержня Бишопа в задаче магнитоупругости с поврежденным стержнем предоставляет возможности для анализа вариантов системы, связанных с релаксацией материала. Классическая модель стержня (Бернулли) не дает провести такой анализ.

В общем случае, в условиях отсутствия ограничений на силу внешнего магнитного поля и характер электрической проводимости материала стержня, исходная система сводится к одному уравнению, которое в переменных стационарной волны и при определенных значениях параметров может быть сведено к уравнению ангармонического осциллятора с двумя типами квадратичной нелинейности. Качественный анализ этого уравнения указывает на возможность распространения локализованных волн солитонного типа и нелинейных периодических волн.

Работа выполнена в рамках государственного задания на проведение фундаментальных научных исследований на 2024-2026 гг. (FFUF -2024-0031, № НИОКТР 1023032800130-3-2.3.2).

Список литературы

1. *Качанов Л.М.* Основы механики разрушения. М., 1974.
2. *Работнов Ю.Н.* Ползучесть элементов конструкций. М., 1966.
3. *Ильюшин А.А.* Об одной теории длительной прочности // МТТ. 1967. № 3. С. 21–35.
4. *Ерофеев В.И., Леонтьева А.В.* Нелинейные продольные пространственно локализованные волны деформации, распространяющиеся в стержне Бишопа, находящемся в магнитном поле и имеющем поврежденность материала // ТМФ. 2025. **225**, № 1. С. 3–22.
5. *Леонтьева А.В.* Распространение продольных волн в стержне Миндлина – Германа, погруженном в нелинейно-упругую среду // Проблемы прочности и пластичности. 2025. **87**, № 1. С. 70–80.

УДК: 534.222.2 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39734

БЕСКОНТАКТНАЯ ДИАГНОСТИКА ПОВЕРХНОСТНЫХ ПЛЁНОК НА ЖИДКОСТИ МЕТОДАМИ НЕЛИНЕЙНОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ АКУСТИКИ

Зимина К. Д.[1,a], Бахтин В. К.[1,2,b], Дерябин М. С.[1,2,c], Касьянов Д. А.[1], Прохоров А. А.[1,2]

[1] *Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН). 603950, г. Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, 46.*

[2] *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» (ННГУ). 603022, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23.*

E-mail:[a]k.zimina@ipfran.ru, [b]bakhtin@ipfran.ru, [c]mmm1984@inbox.ru

Рассматривается возможность бесконтактного определения толщины тонких плёнок на поверхности воды с использованием методов нелинейной акустики. Анализируются временные и спектральные характеристики отражённого интенсивного ультразвукового сигнала, распространяющегося из водной среды и взаимодействующего с поверхностной плёнкой. Экспериментальные исследования выполнены в диапазоне частот 2–3 МГц и демонстрируют высокую чувствительность параметров отражённого сигнала к изменениям толщины плёнки в субмиллиметровом диапазоне. Проведены измерения для плёнок различных жидкостей, включая нефтепродукты; результаты сопоставлены с численным моделированием на основе уравнения Хохлова–Заболотской–Кузнецова. Полученные данные подтверждают перспективность нелинейно-акустических методов для диагностики поверхностных загрязнений водных сред.

Ключевые слова: нелинейные акустические методы, ультразвук, поверхностные плёнки, отражение волн

NON-CONTACT DIAGNOSTICS OF SURFACE FILMS ON LIQUID USING NONLINEAR ULTRASONIC ACOUSTICS METHODS

Zimina K. D.[1,a], Bakhtin V. K.[1,2,b], Deryabin M. S.[1,2,c], Kasyanov D. A.[1], Prokhorov A. A.[1,2]

[1] *Federal Research Center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences (IAP RAS). Nizhny Novgorod 603950, Russia.*

[2] *National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod. Nizhny Novgorod 603022, Russia.*

E-mail:[a]k.zimina@ipfran.ru, [b]bakhtin@ipfran.ru, [c]mmm1984@inbox.ru

The possibility of noncontact determination of the thickness of thin films on the water surface using

nonlinear acoustic methods is considered. The temporal and spectral characteristics of an intense reflected ultrasonic signal propagating from the water medium and interacting with a surface film are analyzed. Experimental studies were carried out in the frequency range of 2–3 MHz and demonstrate high sensitivity of the reflected signal parameters to variations in film thickness in the submillimeter range. Measurements were performed for films of various liquids, including petroleum products; the results are compared with numerical modeling based on the Khokhlov–Zabolotskaya–Kuznetsov equation. The obtained data confirm the potential of nonlinear acoustic methods for diagnostics of surface contamination of water media.

Keywords: nonlinear acoustic methods, ultrasound, surface films, wave reflection

PACS: 43.20.+g

Введение

Поверхностные плёнки на воде, возникающие в результате антропогенных воздействий, в том числе при аварийных разливах углеводородов, существенно влияют на процессы тепло- и массообмена, газообмена и динамику приповерхностного слоя. Ущерб, наносимый нефтяными загрязнениями водным экосистемам, обусловливает необходимость разработки эффективных методов раннего обнаружения и количественной оценки параметров плёнок — в первую очередь их толщины — без нарушения целостности исследуемого слоя.

В настоящее время для оценки толщины поверхностных плёнок применяются оптические, радиолокационные и контактные методы, см. например [1-3]. Оптические методы, основанные на анализе отражённого света и интерференции, эффективны в диапазоне толщин от нескольких микрометров до нескольких миллиметров, однако их применение ограничено условиями освещённости и прозрачности среды. Радиолокационные методы позволяют вести мониторинг больших акваторий из космоса, но не обеспечивают точного определения толщины плёнки в субмиллиметровом диапазоне. Контактные датчики (ёмкостные, кондуктометрические) обладают высокой точностью, но неизбежно искажают исследуемый объект.

В этой связи представляет интерес использование акустических методов [4], позволяющих исследовать взаимодействие ультразвукового излучения с поверхностью воды без механического контакта с плёнкой. В данной работе предлагается акустический метод оценки толщины поверхностных плёнок жидкостей (в том числе нефтепродуктов), основанный на излучении и приёме интенсивных акустических пучков мегагерцового диапазона частот и анализе формы отражённого от поверхности сигнала.

1 Метод исследования

Предлагаемый подход основан на нелинейных свойствах воды: при излучении мощного

радиоимпульса в диапазоне 2–3 МГц в водной среде формируется широкополосный акустический сигнал с пилообразным профилем волны (ударным фронтом), высокочастотные компоненты которого имеют пространственный масштаб, сопоставимый с толщиной исследуемых плёнок. Ультразвуковой излучатель, расположенный в водной среде, излучает интенсивный импульс вертикально вверх к поверхности воды с плёнкой; отражённый от двух границ раздела (вода–плёнка и плёнка–воздух) сигнал принимается широкополосным мембранным ПВДФ-гидрофоном.

Толщина плёнки определяется по временной задержке между отражениями от нижней и верхней границ плёнки: зная скорость звука в материале плёнки и измеряя время прохождения сигнала через плёнку в прямом и обратном направлениях, можно рассчитать её толщину. Фрагмент экспериментальной установки с мембранным ПВДФ-гидрофоном и ультразвуковым излучателем представлен на рис. 1. Сущность предлагаемого метода проиллюстрирована на рис. 2.

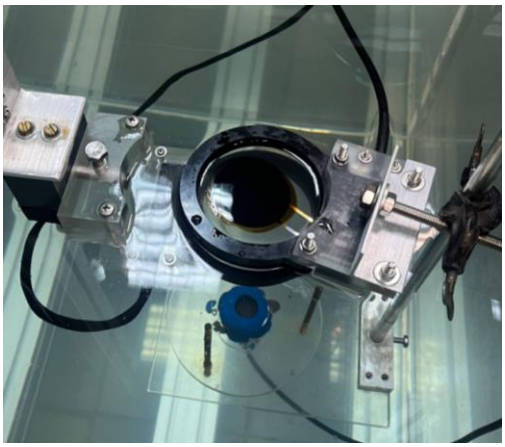


Рис. 1. Мембранный гидрофон с каплей нефти на поверхности воды

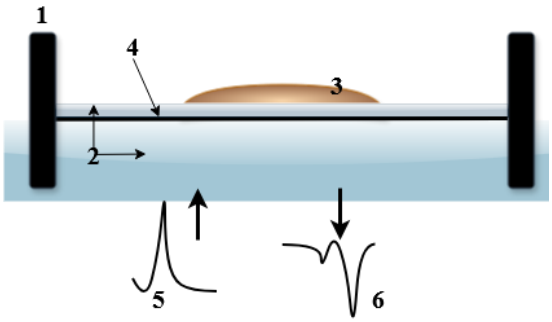


Рис. 2. 1 – мембранный гидрофон; 2 – вода; 3 – пленка на поверхности воды; 4 – мембрана гидрофона; 5 – характерная форма профиля периода волны падающего на пленку сигнала; 6 - характерная форма профиля периода волны отраженного от пленки сигнала

Экспериментальная установка включает в себя пьезоэлектрический излучатель, мембранный ПВДФ-гидрофон и широкополосную систему регистрации. В экспериментах использовались плёнки различных жидкостей — силиконового масла (скорость звука 974 м/с, плотность 967 кг/м³) и нефти (скорость звука 1390 м/с, плотность 871 кг/м³) — в субмиллиметровом диапазоне толщин от десятков микрометров до нескольких десятых миллиметра. Контроль объёма наносимой жидкости позволял воспроизводимо задавать толщину плёнки. Физические параметры исследуемых жидкостей (плотность и скорость звука) определялись независимыми экспериментальными методами.

На рис. 3 приведён характерный профиль падающего на плёнку сигнала. Вследствие

нелинейного распространения через воду заполнение радиоимпульса приобретает пилообразную форму с крутым (ударным) фронтом.

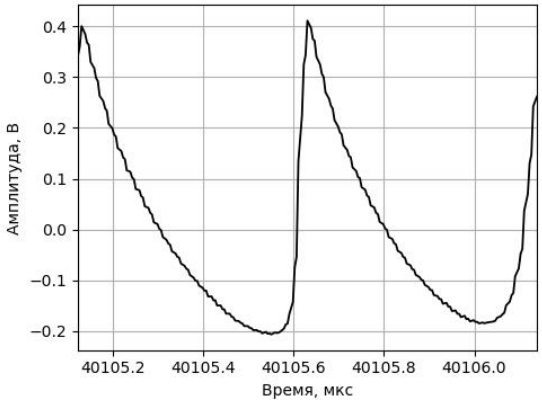


Рис. 3. Характерная форма профиля волны падающего на пленку сигнала

2 Результаты исследований

Анализ отражённых сигналов показал, что наличие поверхностной плёнки приводит к существенному изменению формы акустического отклика. Обе границы (вода–плёнка и плёнка–воздух) являются акустически мягкими, так как импеданс последовательно уменьшается. При отражении от таких границ форма сигнала переворачивается относительно падающего. Малый поперечный размер акустического пучка минимизирует влияние краевых эффектов на границе плёнки. При определённом соотношении толщины плёнки и длины акустической волны в отражённом сигнале наблюдается отчётливое расщепление ударного фронта, обусловленное отражениями от верхней и нижней границ плёнки.

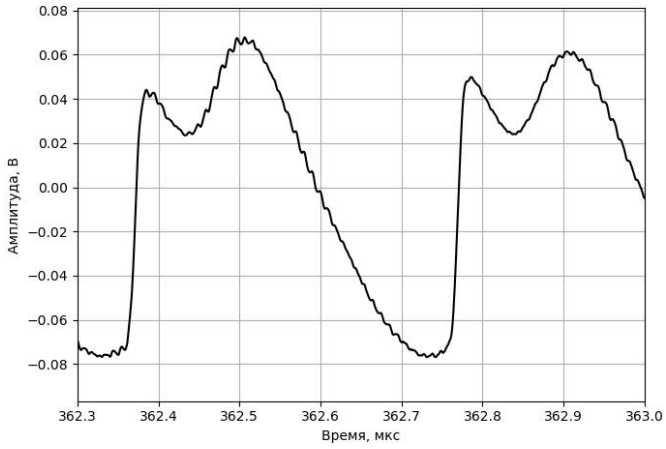


Рис. 4. Профиль волны отраженного акустического сигнала от пленки силиконового масла с характерной толщиной ~ λ/4 (0,1 мм)

В случае, когда толщина плёнки составляет порядка λ/4 (λ – длина волны, соответствующая частоте заполнения радиоимпульса накачки), структура отражённого сигнала проявляется наиболее отчётливо (рис. 4). Локальный минимум на временной

отметке 362,44 мкс, соответствует отражению от границы раздела вода – плёнка, минимум на временной отметке 362,73 мкс связан с отражением от границы раздела плёнка – воздух. Характерная структура сигнала позволяет провести количественную оценку толщины плёнки.

Оценка толщины плёнки проводится по временной задержке между указанными характерными минимумами отражённого сигнала как показано на рис. 5, где стрелками отмечен временной интервал, используемый при оценке. На данном рисунке приведен сигнал, отраженный от нефтяной пленки.

Изменение частоты ультразвукового сигнала позволяет управлять положением и структурой расщеплённого фронта, что даёт возможность автоматически подстраивать алгоритм обработки под заданный диапазон толщин и создавать временную задержку соответствующую, например, 1/4 λ.

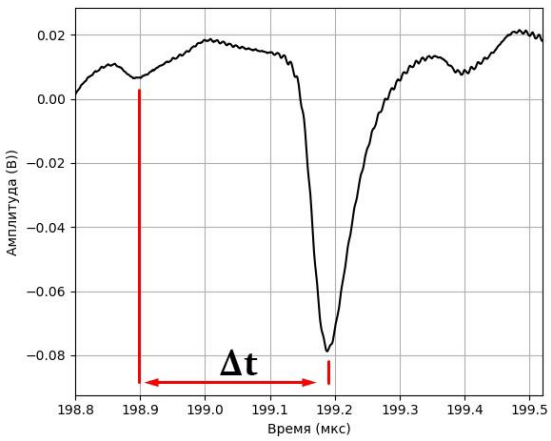


Рис. 5. Определения временной задержки по форме отраженного от нефтяной пленки (~0,29λ, 0,2 мм) акустического сигнала

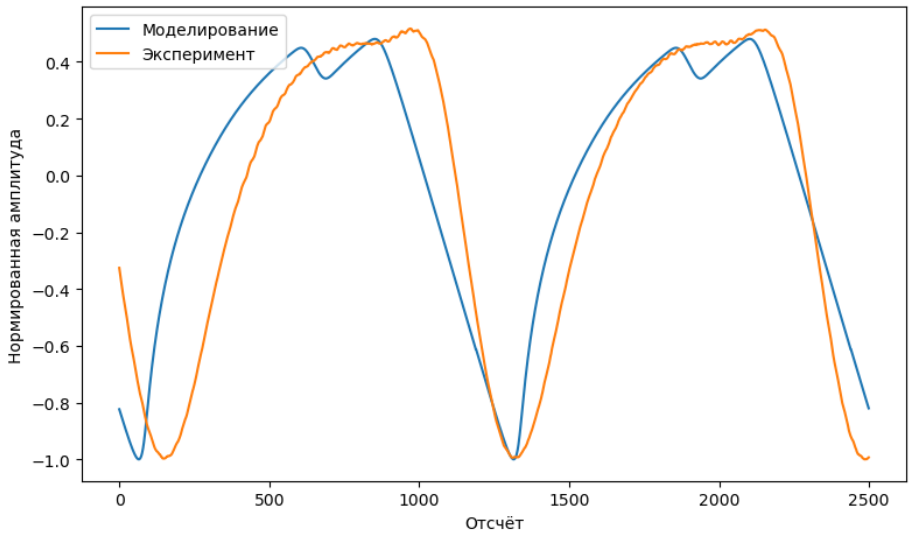


Рис. 6. Сравнение моделирования и эксперимента для плёнки нефти толщиной 0,024 см, F=2,25 МГц

Экспериментальные результаты были сопоставлены с численным моделированием, выполненным в среде MATLAB на основе уравнений Хохлова–Заболотской–Кузнецова. Было получено хорошее соответствие между модельными и экспериментальными результатами, соответствие представлено на рис. 6.

Заключение

В работе продемонстрирована возможность бесконтактной оценки толщины поверхностных плёнок на воде по форме отражённого нелинейного ультразвукового сигнала: анализ расщепления ударного фронта и положения характерных экстремумов позволяет определять толщину в субмиллиметровом диапазоне (~0,05–0,5 мм). Результаты для плёнок силиконового масла и нефти находятся в хорошем согласии с численным моделированием на основе уравнения Хохлова–Заболотской–Кузнецова. К достоинствам метода относятся бесконтактность, применимость к непрозрачным жидкостям. Основное техническое требование — широкополосный приём до сотен МГц — обеспечивается ПВДФ-гидрофонами, технология изготовления которых освоена в ИПФ РАН с перспективой использования отечественного сырья. Предложенный подход представляет интерес для экологического мониторинга водных объектов; дальнейшие работы направлены на автоматизацию обработки сигнала.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН.

Список литературы

1. *Шевелева Т. Ю, Якименко В. И., Прянишников В. А*. Бесконтактный способ измерения толщины нефтяной пленки на поверхности водоемов. Патент SU1059419A1. 1983
2. *Ракуть И. В.* Способ измерения толщины слоя нефти (нефтепродуктов), разлитой на водной поверхности. Патент RU 2650699 C1. 2018.
3. *Бирульчик В.П., Баринов В. С., Шавин П. Б., Мордвинкин И. Н., Андрианов В. А.* Бортовой измеритель слоя нефти, разлитой на водной поверхности. Патент DE 3710789, 2008.
4. *Касьянов Д.А., Седунов Н.А., Фарафонов В.П., Шавин П.Б., Шемагин В.А.* Акустический зонд для определения местоположения границы раздела жидких слоёв. Патент RU 2159412 C1. 2000.

УДК: 534.2. DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39735

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС С ГРАФИЧЕСКИМ ИНТЕРФЕЙСОМ ДЛЯ СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА РАЗЛИЧНЫХ ВРЕМЕННЫХ АЛГОРИТМОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ УРАВНЕНИЯ БЮРГЕРСА

Квашенникова А.В.[1)], Сергеева М.С.[1)], Хохлова В.А.[1)]

[1)] Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова. 119991, Ленинские горы, д. 1, с. 2, Москва, Россия.

Тел.: +7 (495) 939-29-52; Факс: +7 (495) 939-29-52

E-mail: kvashennikovaav@my.msu.ru

В работе представлен программный комплекс с графическим интерфейсом, позволяющий исследовать особенности численного моделирования уравнения Бюргерса, учитывающего эффекты нелинейности и термовязкого поглощения, в ударно-волновых режимах. Рассматривается использование четырёх различных конечно-разностных алгоритмов во временном представлении, применяемых на сегодняшний день при решении задач нелинейной акустики: традиционная консервативная схема; удароулавливающая схема типа Годунова; алгоритм, основанный на точном неявном решении уравнения простых волн с интерполяцией на равномерную численную сетку; схема с использованием внутренних координат кривой профиля. Проводится сравнительный анализ эффективности, точности, особенностей использования и ограничений рассматриваемых алгоритмов в случаях отсутствия и слабого термовязкого поглощения на примере пяти начальных профилей волны: гармоническая волна, один период гармонической волны, эволюционирующей в *S*- и *N*-волну, экспоненциальный импульс с передним ударным фронтом и *N*-волна. Разработанный комплекс может быть использован в качестве дополнения к курсам по нелинейной и вычислительной акустике, а также для выбора численного алгоритма расчета нелинейных эффектов применительно к более сложным волновым задачам описания мощных дифрагирующих фокусированных пучков, распространения нелинейных волн в неоднородных средах и в средах с более сложным частотно-зависимым законом поглощения.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №25-12-00157.

Ключевые слова: программный комплекс, нелинейные волны, уравнение Бюргерса, конечно-разностные временные численные алгоритмы

PACS: 43.25.+y, 43.25.−x.

SOFTWARE PACKAGE WITH A GRAPHICAL USER INTERFACE FOR COMPARATIVE ANALYSIS OF DIFFERENT TIME-DOMAIN ALGORITHMS IN NUMERICAL MODELING OF THE BURGERS EQUATION

Kvashennikova A.V.[1)], Sergeeva M.S.[1)], Khokhlova V.A.[1)]
[1)] Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. 119991, Leninskie Gory, 1, building 2, Moscow, Russia.
E-mail: kvashennikovaav@my.msu.ru

A software package with a graphical user interface is presented for studying the features of numerical modeling of the Burgers equation that accounts for nonlinear effects and thermoviscous absorption in shock-wave regimes. Four different finite-difference time-domain algorithms, currently used in nonlinear acoustics, are considered: a conventional conservative scheme; a shock-capturing Godunov-type scheme; an algorithm based on the exact implicit solution of the simple-wave equation with interpolation onto a uniform numerical grid; and a scheme using intrinsic coordinates of the waveform profile. A comparative analysis of the efficiency, accuracy, implementation features, and limitations of the considered algorithms is performed for cases of zero and weak thermoviscous absorption using five initial waveforms as examples: a periodic sine wave, one cycle of a sine wave evolving into *S* and *N* waves, a shock followed by an exponential tail, and an *N* wave. The developed software package can be used as a supplement to courses in nonlinear and computational acoustics, as well as for selecting numerical algorithms for calculating nonlinear effects in more complex wave problems, such as modeling powerful diffracting focused beams, the propagation of nonlinear waves in inhomogeneous media, and media with more complex frequency-dependent absorption laws. This work was supported by the Russian Science Foundation, Grant No. 25-12-00157.

Keywords: software package, nonlinear waves, Burgers equation, finite-difference time-domain numerical algorithms

PACS: 43.25.+y, 43.25.−x.

УДК 534.222 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39736

Генерация поля второй гармоники в волноводе со вставкой переменного сечения

К.О. Комаровский[a], В.А. Гусев[b]

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

E-mail: [a]kirill_komarovsky_1998@mail.ru, [b]vgusev@bk.ru

Рассмотрены линейные и нелинейные явления, возникающие при распространении акустических волн в узких трубках переменного сечения на примере трубки специального вида. Исследовано прохождение звука через сужение с учетом нелинейных поправок. Полученное уравнение решено методом возмущений. Построены частотные зависимости коэффициента прохождения волны на второй гармонике. Показано, что частотная зависимость коэффициента прохождения носит осциллирующий характер. Представлена частотная зависимость коэффициента прохождения нелинейной волны, а также выполнено сравнение данной зависимости с коэффициентом прохождения волны на основной гармонике в том диапазоне, где наблюдается режим туннелирования.

Ключевые слова: Туннелирование волны, уравнение Вебстера, коэффициент прохождения, нелинейная волна, метод малых возмущений, число Маха.

PACS: 43.20.Bi, 43.25.+y.

Second-harmonic field generation in a waveguide with a variable cross-section insert

K.O. Komarovskii[a], V.A. Gusev[b]

Moscow State University, Moscow, 119991, Russia

e-mail: [a]kirill_komarovsky_1998@mail.ru, [b]vgusev@bk.ru

Linear and nonlinear phenomena arising during the propagation of acoustic waves in narrow tubes of variable cross-section are considered using the example of a specially shaped tube. Sound transmission through a constriction is investigated with account for nonlinear corrections. The resulting equation is solved by the perturbation method. Frequency dependences of the second-harmonic wave transmission coefficient are constructed. It is shown that the frequency dependence of the transmission coefficient exhibits an oscillatory behavior. The frequency dependence of the nonlinear wave transmission coefficient is presented, and a comparison of this dependence with the fundamental harmonic wave transmission coefficient is performed in the frequency range where the tunneling regime is observed.

Keywords: Wave tunneling, Webster equation, transmission coefficient, nonlinear wave, small perturbation method, Mach number.
PACS: 43.20.Bi, 43.25.+y.

Введение

Проблема распространения акустических волн в волноводах широко рассматривается в научной литературе. Особый интерес представляют волноводы переменного поперечного сечения, поскольку в области изменения геометрии канала происходит трансформация волнового фронта, сопровождающаяся специфическими физическими явлениями.

Классическое уравнение Вебстера, описывающее распространение звуковых волн в каналах переменного сечения, основано на предположении о малости акустических возмущений и медленности изменения поперечного сечения. В линейном приближении [1-3] данное уравнение успешно применяется для анализа волноводов при умеренных амплитудах звукового давления. В этом приближении зависимость коэффициента прохождения волны от волнового числа характеризуется наличием плато, близкого к единице, что указывает на проявление эффекта туннелирования, аналогичного наблюдаемому в квантовой механике [2]. Однако при увеличении интенсивности акустического поля линейная модель становится недостаточной: возникают эффекты, обусловленные конечной амплитудой волны, — генерация высших гармоник, искажение профиля волны и формирование ударных фронтов. Для описания этих явлений необходим переход к нелинейному обобщению уравнения Вебстера, учитывающему квадратичную нелинейность среды [4,5].

1. Геометрия задачи и основные уравнения

В соответствии с подходом, изложенным в работе [1,2], рассмотрим задачу о распространении интенсивной акустической волны в узкой трубке, содержащей локальное сужение длиной d в области II. Области I ($x < 0$) и III ($x > d$) представляют собой полубесконечные трубки постоянного поперечного сечения, заполненные средой с равновесной плотностью ρ_0 и скоростью звука c_0. Среда в области сужения II ($0 < x < d$) характеризуется, в общем случае, отличными значениями равновесной плотности ρ и скорости звука c.

Площадь поперечного сечения в области II задается в специальном виде

$$S(x) = S_0 S_\mathrm{m} \mathrm{ch}^2\left[\gamma\left(x - \frac{d}{2}\right)\right], \gamma = \frac{2}{d}\mathrm{arch}\frac{1}{\sqrt{S_\mathrm{m}}}. \quad (1)$$

Здесь S_0 – характерное значение площади сечения на концах сужения: $S(0) = S(d) = S_0$. S_m – минимальная безразмерная площадь сужения, достигаемая при $x = d/2$.

Предполагается, что среда в области II характеризуется существенной нелинейностью и обусловливает возникновение нелинейных эффектов в процессе распространения волны. Для математического описания распространения интенсивных акустических волн в области II с переменным поперечным сечением $S(x)$ используется обобщённое уравнение Вебстера [6]. Введя функцию $F = p\sqrt{S}$, уравнение в области II примет вид:

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 F}{\partial t^2} = \frac{1}{\sqrt{S(x)}}\frac{d^2\sqrt{S(x)}}{dx^2}F - \frac{1}{\sqrt{S(x)}}\frac{\varepsilon}{c^4\rho}\frac{\partial^2 F^2}{\partial t^2}. \quad (2)$$

где p – акустическое давление в области II, x – координата, отсчитываемая вдоль оси системы, t – время, ε – нелинейный параметр.

Далее введем безразмерные переменные $\bar{p} = p/p_i$, $\bar{u} = u/(p_i/\rho c)$, $\bar{F} = F/(p_i\sqrt{S_0})$, $\bar{x} = x/d$, $\bar{t} = \omega t$. Здесь p_i – амплитуда волны, падающей слева на границу сужения, u – колебательная скорость, ω – характерная частота волны, $\alpha = \frac{\rho_0 c_0}{\rho c}$ – безразмерный параметр. Определим также следующие безразмерные параметры: $\bar{k} = \omega d/c$ – безразмерное волновое число в области сужения II, $\bar{k}_0 = \omega d/c_0$ – безразмерное волновое число в средах I и III, $\bar{\gamma} = \gamma d$, $M = p_i/\rho c^2$ – характерное число Маха задачи. Число M можно переписать в виде $M = \text{M}(\rho_0 c_0^2/\rho c^2)$, где $\text{M} = p_i/\rho_0 c_0^2$ – число Маха в падающей волне, а дробь в скобках представляет собой отношение внутренних давлений в средах I (III) и II. В этих переменных для сужения (1) уравнение (2) принимает вид (черту над переменными и параметрами здесь и далее будем опускать):

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x^2} - k^2\frac{\partial^2 F}{\partial t^2} = \gamma^2 F - \frac{\varepsilon k^2 M}{\sqrt{S(x)}}\frac{\partial^2 F^2}{\partial t^2}. \quad (3)$$

2. Генерация второй гармоники в области сужения

Для расчета поля на второй гармонике применим метод возмущений, отыскивая решение уравнения (3) в виде: $F = F_0 + F_1$. Здесь нулевое приближение $F_0 = f_0(x)e^{-it}$ соответствует линейному решению, а F_1 – первое приближение, обусловленное нелинейностью уравнения (3), причем будем считать, что $F_1 \ll F_0$. Для первого приближения $F_1 = f_1(x)e^{-2it}$, где f_1 – комплексная амплитуда второй гармоники, получаем уравнение для f_1:

$$f_1''(x) - \mu_1^2 f_1(x) = 2\frac{\varepsilon k^2 M}{\sqrt{S(x)}}f_0^2(x), \quad (4)$$

где введено обозначение $\mu_1 = \sqrt{\gamma^2 - 4k^2}$. Для линейной задачи $\mu = \sqrt{\gamma^2 - k^2}$.

Ищем решение уравнения (4) методом вариации постоянной – сначала находим решение однородного уравнения, затем константы интегрирования считаем переменными функциями $f_+(x)$ и $f_-(x)$: $f_1(x) = f_+(x)e^{-\mu_1 x} + f_-(x)e^{\mu_1 x}$. Подставляя эту форму решения в (4), получим систему уравнений для $f_+(x)$ и $f_-(x)$:

$$\mu_1 f_-'(x)e^{\mu_1 x} - \mu_1 f_+'(x)e^{-\mu_1 x} = 2\frac{\varepsilon k^2 M}{\sqrt{S(x)}} f_0^2(x), \qquad f_-'(x)e^{\mu_1 x} + f_+'(x)e^{-\mu_1 x} = 0. \tag{5}$$

Из системы уравнений (5) получаем выражения для волн f_+и f_-:

$$f_+(x) = -\frac{\varepsilon k^2 M}{\mu_1}\int_0^x \frac{e^{\mu_1 \tilde{x}}}{\sqrt{S(\tilde{x})}} f_0^2(\tilde{x})\, d\tilde{x} + C_2, \qquad f_-(x) = \frac{\varepsilon k^2 M}{\mu_1}\int_0^x \frac{e^{-\mu_1 \tilde{x}}}{\sqrt{S(\tilde{x})}} f_0^2(\tilde{x})\, d\tilde{x} + C_1, \tag{6}$$

где константы интегрирования C_1, C_2 определены как амплитуды волн нелинейных поправок на левой границе трубки при $x = 0$.

Константы C_1, C_2 в формулах (6) должны быть найдены из решения граничной задачи с условиями непрерывности полей давления и колебательной скорости на границах областей I и II, II и III. Для записи граничных условий необходимо выразить колебательную скорость через давление, используя уравнение Эйлера: $\hat{\rho}\left(\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{M}{k}u\frac{\partial u}{\partial x}\right) = -\frac{1}{k}\frac{\partial p}{\partial x}$. Здесь $\hat{\rho}$ – полная плотность с учетом акустической компоненты, нормированная на равновесную плотность ρ. Решая уравнение методом возмущений по числу Маха, $u = u_0 + Mu_1$, получаем:

$$u_1 = -\frac{i}{2k}\frac{\partial p_1}{\partial x} - \frac{iu_0}{2k}\frac{\partial u_0}{\partial x} - \frac{p_0 u_0}{2}. \tag{7}$$

Возвращаясь от функций *F* для нулевого и первого приближений к давлению, в области II ($0 < x < 1$) получим:

$$p_0 = \frac{1}{\sqrt{S(x)}}(P_+ e^{-\mu x} + P_- e^{\mu x}), \qquad p_1 = \frac{1}{\sqrt{S(x)}}(f_-(x)e^{\mu_1 x} + f_+(x)e^{-\mu_1 x}). \tag{8}$$

В областях I ($x < 0$) и III ($x > 1$) с постоянным сечением поля имеют вид:

$$p_{\mathrm{I}} = P_r e^{-ik_0 x}, u_{\mathrm{I}} = -\frac{1}{\alpha}P_r e^{-ik_0 x}, \qquad p_{\mathrm{III}} = P_t e^{ik_0(x-1)}, u_{\mathrm{III}} = \frac{1}{\alpha}P_t e^{ik_0(x-1)}. \tag{9}$$

Здесь величины P_r, P_t – амплитуды отраженной и прошедшей волн на второй гармонике.

Для расчета коэффициента прохождения волны на второй гармонике $T_2 = P_t$ наложим условие непрерывности полей давления *p* и скорости *u* на границах области II с сужением (при

$x = 0$ и $x = 1$). Используя соотношения (7) – (9) с учетом (6) можно построить частотные зависимости $|T_2|^2$ от безразмерного волнового числа k.

Из рис. 1 видно осциллирующее поведение $|T_2|^2$с чередованием резонансных пиков и глубоких минимумов, причем точки резонансов не сдвигаются или сдвигаются незначительно при изменении S_m. В низкочастотной области (где проявляется эффект туннелирования для линейной волны) коэффициент прохождения весьма мал.

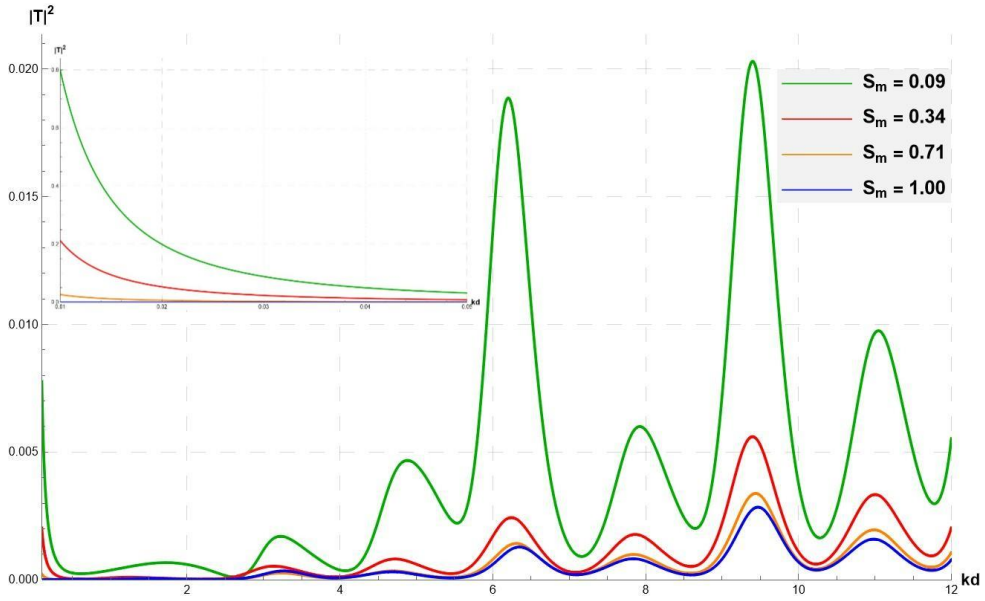


Рис. 1. Частотная зависимость квадрата модуля коэффициента прохождения волны второй гармоники. На врезке более подробно приведен график для малых значений k.

На рис. 2 можно заметить, что увеличение безразмерного параметра M ведет к резкому увеличению коэффициента прохождения волны на второй гармонике, при этом сдвига точек резонанса не наблюдается.

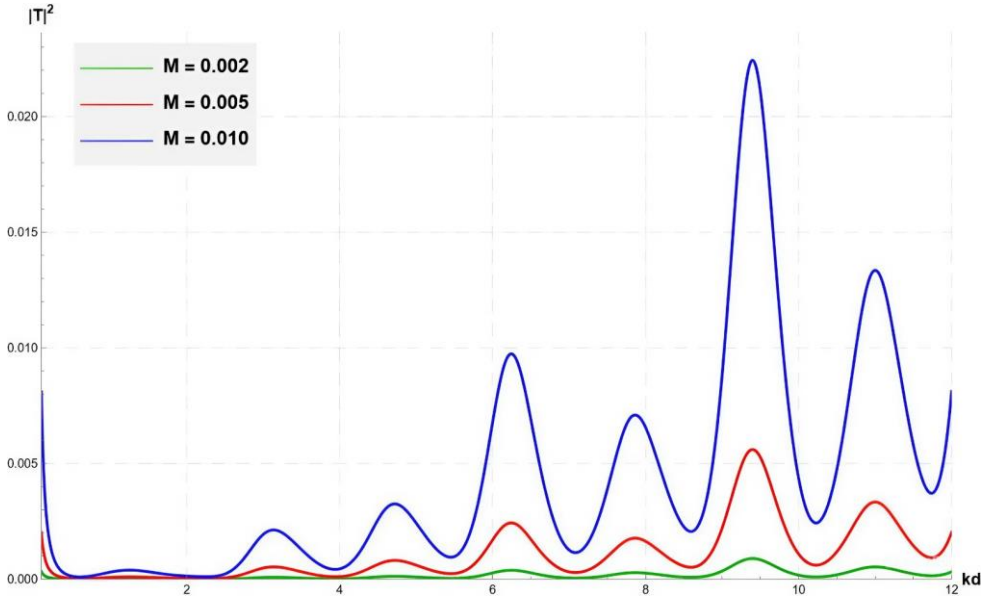


Рис. 2. Частотные зависимости квадрата модуля коэффициента прохождения волны на второй гармонике при разных параметрах M.

Заключение

Было получено приближенное решение уравнения Вебстера, описывающего распространение волн в узких трубках переменного сечения, с учетом нелинейности методом возмущений, а также получены частотные зависимости коэффициента прохождения нелинейной волны. Замечено, что частотные зависимости коэффициента прохождения носят осциллирующий характер, а увеличение сужения трубки приводит к увеличению коэффициента прохождения. В низкочастотной области коэффициент прохождения нелинейной волны выше, чем в трубке постоянного сечения и имеет почти постоянное значение, то есть передача сигнала в этом диапазоне происходит без искажений.

Список литературы:

1. *Гусев В.А., Комаровский К.О.* // Известия РАН. 2025. Т. 89. № 4. С. 654–659.
2. *Руденко О.В., Шварцбург А.Б.* // Акуст. журн. 2019. Т. 61. № 1. С. 30–39.
3. *Gusev V.A., Komarovskii K.O.* // Physics Of Wave Phenomena 2025. V. 33. P. 361-367.
4. *Ковалев В.Ф., Руденко О.В.* // Акуст. журн. 2012. Т. 58. № 3. С. 296-303.
5. *Ковалев В.Ф., Куликов Р.В.* // Уфимский математический журнал. 2012. Т. 4. № 4. С. 91–108.
6. *Руденко О.В.* Нелинейные пилообразные волны // УФН. 1995. Т. 165(9). С. 1011–1036.

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39737

GPU-РЕАЛИЗАЦИЯ ЧИСЛЕННОЙ СХЕМЫ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ ВЕСТЕРВЕЛЬТА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИНТЕНСИВНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПУЧКОВ В УДАРНО-ВОЛНОВЫХ РЕЖИМАХ

Коннова Е.О.[1)], Хохлова В.А.[1)], Юлдашев П.В.[1)]
[1)] *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва;*
Тел.: +7 (495) 939-29-52
E-mail: helen.7aprel@gmail.com

Актуальной задачей для ряда научных и прикладных направлений нелинейной акустики как, например, медицинская и воздушная акустика, является численное моделирование интенсивных звуковых пучков в различных средах, которое часто основывается на решении однонаправленного нелинейного уравнения Вестервельта. Моделирование ударно-волновых полей требует учета большого числа гармоник (до 1000) и пространственных сеток с малым шагом (матрицы 10000×10000), что делает вычисления на CPU крайне затратными и часто требует использования суперкомпьютерных мощностей. Целью работы являлась разработка высокоэффективного GPU-алгоритма на основе уравнения Вестервельта с использованием технологии Nvidia CUDA и сравнение с аналогичным алгоритмом для центральных процессоров. Реализация на платформе CUDA включает три специализированных вычислительных ядра: для оператора дифракции используется метод углового спектра, для нелинейного оператора с учетом образования разрывов — удароулавливающая схема типа Годунова, а поглощение рассчитывается аналитически в спектральном представлении. Для сравнения производительности создана CPU-программа на C++ с применением высокоэффективной библиотеки быстрого преобразования Фурье (БПФ) FFTW и использованием технологии OpenMP для многопоточных вычислений. Расчеты для задач с большим объемом данных выполнялись на вычислительном сервере Dell PowerEdge R720 с ускорителем Tesla K40c на 12 Гб видеопамяти и с объемом оперативной памяти 256 Гб. Разрабатываемый подход обеспечил ускорение расчетов в десятки раз по сравнению с CPU-версией, делая моделирование ультразвуковых полей с ударными фронтами доступным и на современных стандартных ПК при наличии достаточного объема оперативной памяти. Работа поддержана грантом РНФ № 25-12-00141.

Ключевые слова: нелинейное уравнение Вестервельта, метод Годунова, фокусированные ультразвуковые пучки, графические ускорители

GPU-IMPLEMENTATION OF A NUMERICAL SCHEME FOR SOLVING THE WESTERVELT EQUATION FOR MODELING HIGH-INTENSITY ULTRASOUND BEAMS IN SHOCK-WAVE REGIMES

Konnova E.O.[1)], Khokhlova V.A.[1)], Yuldashev P.V.[1)]
[1)] *Moscow State University, Moscow, 119991 Russia;*
E-mail: helen.7aprel@gmail.com

An actual challenge in several scientific and applied branches of nonlinear acoustics, such as medical acoustics and aeroacoustics, is the numerical modeling of high-intensity sound beams in various media, which is often based on solving the one-way nonlinear Westervelt equation. Simulating shock-wave fields requires accounting for a large number of harmonics (up to 1000) and spatial grids with small steps (matrices of 10000×10000), making CPU computations extremely expensive and often necessitating supercomputer resources. The aim of this work was to develop a highly efficient GPU algorithm based on the Westervelt equation using Nvidia CUDA technology and to compare it with a similar CPU-based algorithm. The CUDA implementation includes three specialized computational kernels: the angular spectrum method is used for the diffraction operator, a Godunov-type shock-capturing scheme is employed for the nonlinear operator with discontinuity formation, and absorption is calculated analytically in the spectral domain. For performance comparison, a CPU program was developed in C++ using the high-performance FFT library FFTW and OpenMP technology for multithreaded computing. Computations for large-scale problems were performed on a Dell PowerEdge R720 server with a Tesla K40c graphics processor (12 GB VRAM) and 256 GB of RAM. The new approach runs tens of times faster than the CPU version, making the simulation of ultrasound fields with shock fronts accessible even on modern standard personal computers, provided sufficient RAM is available. This work was supported by Russian Science Foundation Grant No. 25-12-00141.

Keywords: nonlinear Westervelt equation, Godunov's method, focused ultrasound beams, graphics processing units (GPUs)

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39738

Акустические свойства линейных вязкоупругих сред с памятью: отсутствие дисперсионного соотношения и запрет ударных волн

Д.А. Приказчиков[1,a], И.Б. Петров[1,b]

[1]Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Институтский переулок, д. 9, г. Долгопрудный, Московская обл., 141701, Россия
E-mail: [a]prikazchikov.da@mipt.ru, [b]petrov@mipt.ru

Аннотация: В работе исследуются акустические свойства линейных вязкоупругих сред, определяющие соотношения которых содержат интегральные операторы с ядрами типа Работнова. На основе принципа Вольтерра и аппарата дробного исчисления показано, что учет длительной памяти материала приводит к качественному изменению волновой динамики. Установлено, что в отличие от классических упругих сред, для таких систем невозможно построить явное дисперсионное соотношение, не зависящее от времени, поскольку операторы памяти вносят нелокальность по временной переменной, и скорость распространения возмущений зависит от предыстории процесса. С использованием метода Фурье и анализа дробно-дифференциальных уравнений доказана теорема о бесконечной дифференцируемости решения по времени при аналитическом характере внешнего воздействия. Из этого результата следует принципиальный вывод: в рассматриваемых средах невозможно формирование ударных волн (разрывов решения), характерных для нелинейной акустики, так как решение сохраняет гладкость сколь угодно высокого порядка. Предложен численный метод на основе сеточно-характеристического подхода и аппроксимаций дробных производных. Приведены результаты расчетов, демонстрирующие отличия волновых картин в вязкоупругих средах от классических упругих моделей. Полученные результаты важны для акустики среды обитания при моделировании распространения колебаний в грунтах, полимерных композитах и биологических тканях, обладающих свойствами памяти.

Ключевые слова: вязкоупругость, акустические свойства, дробные производные, память материала, дисперсия, ударные волны, бесконечная гладкость, модель Работнова.

Acoustic Properties of Linear Viscoelastic Media with Memory: Absence of Dispersion Relation and Prohibition of Shock Waves

D.A. Prikazchikov[1,a], I.B. Petrov[1,b]

[1]Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), 9 Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia

E-mail: [a]prikazchikov.da@mipt.ru, [b]petrov@mipt.ru

Abstract: The paper investigates the acoustic properties of linear viscoelastic media whose constitutive relations contain integral operators with Rabotnov-type kernels. Based on the Volterra

principle and the apparatus of fractional calculus, it is shown that taking into account the long-term memory of the material leads to a qualitative change in wave dynamics. It is established that, unlike classical elastic media, it is impossible to construct an explicit time-independent dispersion relation for such systems, since memory operators introduce nonlocality in the time variable, and the propagation velocity of perturbations depends on the process prehistory. Using the Fourier method and the analysis of fractional differential equations, a theorem on the infinite differentiability of the solution in time under an analytical external influence is proved. This fundamental result implies that in the media under consideration, the formation of shock waves (solution discontinuities) characteristic of nonlinear acoustics is impossible, since the solution retains smoothness of an arbitrarily high order. A numerical method based on the grid-characteristic approach and approximations of fractional derivatives is proposed. The results of calculations demonstrating the differences in wave patterns in viscoelastic media from classical elastic models are presented. The obtained results are important for the acoustics of the living environment when modeling the propagation of vibrations in soils, polymer composites, and biological tissues exhibiting memory properties.

Keywords: viscoelasticity, acoustic properties, fractional derivatives, material memory, dispersion, shock waves, infinite smoothness, Rabotnov model.

PACS: 43.20.Bi, 43.20.Gp, 43.35.Cg, 46.05.+b

Введение

При изучении акустических свойств среды обитания — грунтов, полимерных композитов, биологических тканей — часто обнаруживается, что их поведение не укладывается в рамки классической теории упругости. Многие реальные материалы обладают свойством «памяти»: их реакция на внешнее воздействие зависит не только от текущего состояния, но и от всей предыстории деформирования [1]. Это явление, называемое вязкоупругостью, особенно ярко проявляется при длительных или циклических нагрузках.

Математические основы теории вязкоупругости были заложены Вольтерра [2] и получили развитие в работах Работнова [3, 4], где были предложены различные типы ядер интегральных операторов, учитывающих память материала. Особый интерес представляет модель Работнова, использующая аппарат дробного интегродифференцирования [5, 6] и позволяющая эффективно описывать материалы с медленно затухающей памятью.

Влияние вязкоупругости на волновую динамику имеет принципиальное значение для акустики. В данной работе мы покажем, что учет памяти материала приводит к двум важнейшим следствиям: (1) невозможности построения классического дисперсионного соотношения, не зависящего от времени, и (2) запрету на формирование ударных волн из-за сохранения бесконечной гладкости решения.

1. Постановка задачи

Запишем уравнение теории упругости в перемещениях [7]:

$$\rho\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}= G(\Delta u+\frac{1}{3}\nabla(\nabla\cdot u))+K\nabla(\nabla\cdot u)+f(t,x),$$

где u — поле смещений, G — модуль сдвига, K — коэффициент всестороннего сжатия.

Согласно принципу Вольтерра [2], переход к вязкоупругой среде осуществляется заменой упругих констант на интегральные операторы:

$$G\to G(I+N^{\zeta}),K\to K(I+M^{\zeta}),$$

где N^{ζ} и M^{ζ} — интегральные операторы Вольтеррова типа с ядрами, описывающими память материала на сдвиг и сжатие соответственно, а I - тождественный оператор.

Для ядер, соответствующих модели Работнова [4], интегральные операторы принимают вид:

$$K^{\zeta}u=\int_0^t E_\alpha(-\beta,t-\tau)u(\tau)d\tau,$$

где $E_\alpha(-\beta,t)$ — функция Работнова:

$$E_\alpha(-\beta,t)=t^\alpha\sum_{k=0}^{\infty}\frac{(-\beta)^k t^{k(1+\alpha)}}{\Gamma[(k+1)(1+\alpha)]},\alpha\in(-1,0).$$

С учетом этого система (5) преобразуется к интегродифференциальному виду, который удобно переписать в переменных скорость-градиенты скорости, вводя дополнительные переменные, описывающие память [8]. В результате получается система дробно-дифференциальных уравнений, где D^α — мультииндекс, обозначающий свою степень дробной производной для каждой компоненты:

$$D^\alpha w= A_1\frac{\partial w}{\partial x_1}+A_1\frac{\partial w}{\partial x_1}+A_1\frac{\partial w}{\partial x_1}+Cw+f.(1)$$

2. Отсутствие явного дисперсионного соотношения

В классической акустике дисперсионное соотношение $\omega=\omega(k)$ играет фундаментальную роль, связывая частоту и волновое число и определяя фазовую и групповую скорости волн. Для упругой среды оно выводится из волнового уравнения и не зависит от времени.

Для анализа возможности получения дисперсионного соотношения в вязкоупругом случае рассмотрим упрощенное одномерное уравнение:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}=c^2\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+A\int_0^t E_\alpha(-\beta,t-\tau)u(\tau,x)d\tau+f(t,x).(2)$$

Применяя метод разделения переменных Фурье $u(x,t)=X(x)T(t)$ и решая задачу Штурма-Лиувилля для пространственной части, получаем систему для временных мод:

$$T_k''(t)=c^2\lambda_k T_k(t)+AI_k(t)+c_k(t),(3)$$

$$D_t^{-\alpha} I_k(t) = -\beta I k_k(t) - \beta T_k(t), (4)$$

где $D_t^{-\alpha}$ — дробная производная по Капуто, $I_k(t) = \int_0^t E_\alpha(-\beta, t-\tau) T_k(\tau) d\tau$, а λ_k — собственные числа оператора Лапласа.

Ключевое наблюдение: уравнения для разных моментов времени t связаны через интегральный оператор $I_k(t)$. Это означает, что соотношение между «частотой» (скоростью изменения T_k и «волновым числом» (собственным значением λ_k) не может быть записано в замкнутой форме, не зависящей от времени. Скорость распространения возмущения в каждый момент времени зависит от всей предыстории процесса в данной точке среды. Среда «помнит», как она деформировалась ранее, и это влияет на текущую динамику.

Таким образом, для рассматриваемого класса вязкоупругих сред понятие дисперсионного соотношения в его классическом понимании теряет смысл. Волновой пакет эволюционирует сложным образом, и его форма в каждый момент времени определяется не только частотным составом, но и временем, прошедшим с начала воздействия.

3. Бесконечная гладкость и запрет ударных волн

Одним из центральных результатов нелинейной акустики является возможность формирования ударных волн — разрывов решения, возникающих из-за конкуренции нелинейности и диссипации. Однако в рассматриваемой линейной вязкоупругой среде с памятью ситуация принципиально иная.

Теорема. Пусть внешняя сила $f(t,x)$ в уравнении (2) является аналитической по времени. Тогда решение $u(t,x)$ бесконечно дифференцируемо по временной переменной.

Доказательство (схема). Из системы (3, 4) с учетом свойств функции Работнова и групповых свойств дробных производных [6] следует, что если $c_k(t)$ аналитичны, то $T_k(t)$ и $I_k(t)$ также аналитичны. Следовательно, все их производные по времени существуют и непрерывны. Так как разложение по собственным функциям сходится равномерно вместе с производными, функция $u(t,x)$ также бесконечно дифференцируема по t.

Следствие (Запрет ударных волн). В линейной вязкоупругой среде с памятью типа Работнова невозможно формирование разрывов решения (ударных волн) при аналитических внешних воздействиях.

Этот результат качественно отличает вязкоупругие среды от классических упругих. Интегральные операторы памяти, даже будучи линейными, «сглаживают» решение по времени, не позволяя возникнуть разрывам. Даже если бы мы попытались смоделировать ударное воздействие, решение осталось бы гладким (хотя и с очень большими градиентами) благодаря «памяти» материала о предшествующем гладком состоянии.

4. Численный метод и результаты

Для численного решения системы (1) применяется сеточно-характеристический подход [9, 10] в сочетании с аппроксимациями дробных производных через суммы Римана-Лиувилля [11]. Пространственная дискретизация выполняется по схеме Лакса-Вендроффа второго порядка.

Были проведены расчеты для двух типов сред: однородной вязкоупругой среды (стеклотекстолит) и слоистой структуры, состоящей из чередующихся упругих (стекло) и вязкоупругих (стеклотекстолит) слоев. Начальные условия моделировали ударное воздействие вблизи свободной поверхности.

Результаты расчетов показывают, что волновые картины в вязкоупругой среде качественно отличаются от упругого случая. Наблюдается несколько более медленное затухание и «сглаживание» фронтов, что согласуется с теоремой о бесконечной гладкости.

Заключение

В работе показано, что учет вязкоупругих свойств среды обитания (памяти материала) приводит к двум фундаментальным следствиям для акустики:

1. Отсутствие классического дисперсионного соотношения. Скорость распространения акустических волн становится зависящей от времени и предыстории процесса, что исключает возможность описания среды частотно-зависимыми параметрами в традиционном смысле.
2. Запрет на формирование ударных волн. Благодаря бесконечной гладкости решения по времени, в линейных вязкоупругих средах с памятью типа Работнова невозможны разрывы, характерные для ударных волн. Это важное ограничение необходимо учитывать при моделировании экстремальных акустических воздействий на материалы, обладающие памятью.

Полученные результаты имеют прямое отношение к акустике среды обитания, где грунты, полимеры, биоткани и композиты часто проявляют выраженные вязкоупругие свойства.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-11-00035.

Список литературы

1. *Работнов Ю.Н.* Ползучесть элементов конструкций. — М.: Наука, 1966. — 752 с.
2. *Вольтерра В.* Теория функционалов, интегральных и интегро-дифференциальных уравнений. — М.: Наука, 1982. — 300 с.
3. *Работнов Ю.Н.* Элементы наследственной механики твёрдых тел. — М.: Наука, 1977. — 384 с.

4. *Rabotnov Yu.N.* Creep Problems in Structural Members. — Amsterdam: North-Holland, 1969. — 822 p.
5. *Самко С.Г., Кильбас А.А., Маричев О.И.* Интегралы и производные дробного порядка и некоторые их приложения. — Минск: Наука и техника, 1987. — 688 с.
6. *Учайкин В.В.* Метод дробных производных. — Ульяновск: Артишок, 2008. — 512 с.
7. *Мусхелишвили Н.И.* Некоторые основные задачи математической теории упругости. — М.: Изд-во АН СССР, 1954.
8. *Петров И.Б., Приказчиков Д.А., Хохлов Н.И.* Численное решение интегродифференциальных уравнений теории вязкоупругости с ядрами экспоненциального и работновского типов // Доклады РАН. Математика, информатика, процессы управления. — 2024. — Т. 505. — С. 46–49.
9. *Самарский А.А., Попов Ю.П.* Разностные методы решения задач газовой динамики. — М.: Наука, 1992. — 424 с.
10. *Самарский А.А.* Теория разностных схем. — М.: Наука, 1977. — 656 с.
11. *Alikhanov A.A.* A new difference scheme for the time fractional diffusion equation // Journal of Computational Physics. — 2014. — P. 424-438.

УДК: 534.2. DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39739

Моделирование полного нелинейного волнового уравнения для исследования параметрической генерации волны разностной частоты фокусирующим бигармоническим излучателем

М.С. Сергеева[1,a], А.В. Квашенникова[1], П.В. Юлдашев[1], В.А. Хохлова[1]

[1] *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.*

E-mail: [a]s_masha_ss@mail.ru

Рассмотрена задача численного моделирования параметрической генерации волны разностной частоты (ВРЧ) фокусирующим двухчастотным излучателем для случаев, когда длина нелинейного взаимодействия волн накачки в фокальной области сравнима с длиной ВРЧ, что характерно для медицинских приложений фокусированного ультразвука. Моделирование проведено для осесимметричного излучателя в воде. Поле ВРЧ рассчитывалось в рамках модели Хохлова–Заболотской–Кузнецова, а также на основе решения полного нелинейного волнового уравнения в квазилинейном приближении с учетом локальной нелинейности. Проведено сравнение результатов для пространственных распределений амплитуды давления ВРЧ. Исследовано влияние степени фокусировки излучателя и параметров двухчастотного сигнала накачки на эффективность генерации, пространственную структуру поля ВРЧ и степень выраженности локальных нелинейных эффектов. Показаны ограничения применимости параболического приближения.

Ключевые слова: нелинейные взаимодействия, волна разностной частоты, полное нелинейное волновое уравнение, фокусирующий параметрический излучатель.

Numerical modeling of the second-order nonlinear wave equation for studying parametric generation of a difference-frequency wave by a focused dual-frequency transducer

M.S. Sergeeva[1,a], A.V. Kvashennikova[1], P.V. Yuldashev[1], V.A. Khokhlova[1]

[1] *Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia.*

E-mail: [a]s_masha_ss@mail.ru

The problem of numerical modeling of parametric generation of a difference-frequency wave (DFW) by a focused dual-frequency transducer is considered for cases when the region of nonlinear interaction of pump waves in the focus is comparable to the DFW wavelength, which is

characteristic of medical applications of high-intensity focused ultrasound. Simulations were performed for an axisymmetric transducer in water. The DFW field was calculated with the Khokhlov–Zabolotskaya–Kuznetsov model, as well as solving the second-order nonlinear wave equation in the quasilinear approximation with account for local nonlinearity. A comparative analysis of the obtained results for spatial distributions of the DFW pressure amplitude was conducted. The influence of transducer focusing angle and dual-frequency pump signal parameters on the generation efficiency, spatial structure of the DFW field, and the magnitude of local nonlinear effects was investigated. The limitations of the parabolic approximation are demonstrated.
Keywords: nonlinear interactions, difference-frequency wave, second-order nonlinear wave equation, focused parametric transducer.
PACS: 43.25.+y, 43.25.−x

Введение

В последние годы параметрическая генерация волны разностной частоты (ВРЧ) в поле излучателей высокоинтенсивного фокусированного ультразвука (ФУЗ) рассматривается как перспективный инструмент неинвазивного мониторинга терапевтического ультразвукового воздействия в различных медицинских приложениях [1, 2]. Благодаря значительно более слабому затуханию в биологических тканях по сравнению с волнами накачки, ВРЧ может быть зарегистрирована вне зоны воздействия, а характеристики её поля чувствительны к локальным изменениям акустических свойств среды, что позволяет дистанционно контролировать изменения ткани в фокальной зоне [1]. В транскраниальных приложениях амплитуда ВРЧ также может служить индикатором качества фокусировки ультразвукового пучка, позволяя оценивать степень аберраций ультразвукового поля на костных структурах черепа и эффективность их компенсации [2].

Ранее был осуществлен анализ характеристик поля ВРЧ на основе численного решения однонаправленного параболического уравнения Хохлова–Заболотской–Кузнецова (ХЗК) [3]. Однако в случае сильно фокусированных излучателей и большого значения отношения частот накачки к разностной частоте (коэффициент трансформации частоты) размеры области нелинейного взаимодействия волн накачки становятся сравнимы с длиной ВРЧ. Это ограничивает применимость данной модели, которая не учитывает высокочастотные пространственные компоненты источников, обратное рассеяние и вклад локальной нелинейности [4]. В связи с этим в работе реализован численный алгоритм решения полного нелинейного волнового уравнения [4, 5] для ВРЧ и проведен сравнительный анализ его результатов с решением уравнения ХЗК для определения границ применимости однонаправленной параболической модели.

1 Численные модели описания параметрической генерации ВРЧ в поле фокусирующего бигармонического излучателя

1.1 Однонаправленная параболическая модель Хохлова–Заболотской–Кузнецова

Процесс генерации ВРЧ осесимметричным двухчастотным параметрическим излучателем в рамках однонаправленной параболической модели описывается с помощью двумерного уравнения ХЗК [4], которое в сопровождающей системе координат имеет вид:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial\tau\partial z}=\frac{c_0}{2}\left(\frac{\partial^2 p}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial p}{\partial r}\right)+\frac{\beta}{2\rho_0 c_0^3}\frac{\partial^2 p^2}{\partial\tau^2}+\frac{\delta}{2c_0^3}\frac{\partial^3 p}{\partial\tau^3}. \qquad (1)$$

Здесь p – акустическое давление, z – координата вдоль оси пучка, r – радиальная координата, $\tau = t - z/c_0$ – время в сопровождающей системе координат, c_0 – скорость звука, ρ_0 – плотность, β и δ – коэффициенты нелинейности и термовязкого поглощения в среде.

В квазилинейном приближении уравнение (1) записывается в виде системы связанных уравнений для амплитуд давления волн накачки и ВРЧ, которая решается численно с помощью метода расщепления по физическим факторам, что подробно описано в [3]. При постановке граничного условия для волн накачки для фокусирующего сферического излучателя используется метод эквивалентного излучателя [3, 6], позволяющий перенести условие с поверхности сферического сегмента на плоскость без потери точности решения параболического уравнения ХЗК на оси пучка в фокальной области.

1.2 Полное нелинейное волновое уравнение

Полное нелинейное волновое уравнение (ВУ), необходимое для количественно более точного описания поля ВРЧ, записывается как [4, 5]:

$$\left(\Delta-\frac{1}{c_0^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2}\right)p=-\frac{\delta}{c_0^4}\frac{\partial^3 p}{\partial t^3}-\frac{\beta}{\rho_0 c_0^4}\frac{\partial^2 p^2}{\partial t^2}+L_{\text{loc}}. \qquad (2)$$

Здесь $\Delta = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2 + \partial^2/\partial z^2$ – оператор Лапласа в декартовых координатах, L_{loc} – нелинейный Лагранжиан локального взаимодействия вида

$$L_{\text{loc}}=\left(\Delta+\frac{1}{c_0^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2}\right)\left(\frac{\rho_0\left(\nabla p/\left(\omega\rho_0\right)\right)^2}{2}+\frac{p^2}{2\rho_0 c_0^2}\right). \qquad (3)$$

Решение уравнения (2) для амплитуды давления ВРЧ p_{dif} строится как $p_{\text{dif}} = \tilde{p} + p_{\text{loc}}$, где $\tilde{p}$ – решение уравнения (2) без учета локальных взаимодействий, а p_{loc} – добавка, обусловленная локальными эффектами из уравнения (3) [5]:

$$p_{\text{loc}}=\left(\frac{\omega_1}{\omega_2}+\frac{\omega_2}{\omega_1}-1\right)\frac{p_1 p_2^*}{2\rho_0 c_0^2}-\frac{\nabla p_1\nabla p_2^*}{2\rho_0\omega_1\omega_2}, \qquad (4)$$

где $\omega_{1,2} = 2\pi f_{1,2}$ – циклические частоты волн накачки.

Уравнение (2) в квазилинейном приближении без учета локальных эффектов решается с помощью перехода в k-пространство путем применения пространственного преобразования Фурье по координатам (x, y), в котором уравнение (2) представляет неоднородное одномерное по z уравнение Гельмгольца с функцией источников в виде двумерной свертки пространственных спектров волн накачки [7] и решается с помощью интегрирования с одномерной функцией Грина [7].

1.3 Параметры моделирования

Численное моделирование проводилось на примере ФУЗ-излучателя в виде сферического сегмента с различной степенью фокусировки и различным отношением частоты накачки к разностной частоте (коэффициент трансформации частоты). Диафрагменное число $F\# = F/2a$, где $a = 5$ см – радиус излучателя, F – его фокусное расстояние, варьировалось от 0.9 (сильная фокусировка) до 2 (слабая фокусировка). Коэффициент трансформации частоты, определяемый как f_m/f_{dif}, где $f_m = (f_1 + f_2)/2$ – центральная частота, $f_{dif} = (f_1 - f_2)$ – разностная частота, варьировался в пределах от 3.2 до 10.5, при этом $f_1 = 1.1$ МГц и $f_2 = 0.8$ МГц –1.0 МГц, что характерно для бигармонических транскраниальных ФУЗ излучателей [2]. Амплитуда давления на поверхности излучателя $p_0 = 25$ кПа [8] соответствует квазилинейному режиму для всех исследуемых случаев. Параметры среды для воды: $c_0 = 1486$ м/с, $\rho_0 = 998$ кг/м^3, $\beta = 3.5$ и $\delta = 4.33 \times 10^{-6}$ м^2/с.

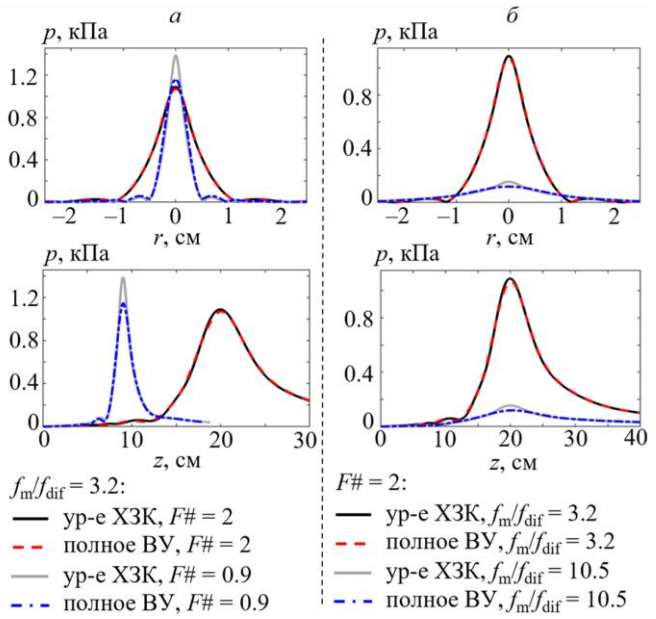


Рис. 1. Поперечные (верхний ряд) и продольные (нижний ряд) одномерные распределения амплитуды ВРЧ при изменении диафрагменного числа $F\#$ от 2 до 0.9 для $f_1/f_{dif} = 3.2$ (*а*) и при изменении f_1/f_{dif} от 3.2 до 10.5 для $F\# = 2$ (*б*).

2 Результаты

На рис. 1 показаны одномерные продольные и поперечные распределения амплитуды давления ВРЧ, полученные при расчете с помощью двух численных моделей. Вначале расчеты проводились для случая $F\# = 2$ и $f_m/f_{dif} = 3.2$ (слабая фокусировка и небольшое значение f_m/f_{dif}), когда параболическое приближение применимо: в этом случае результаты двух подходов хорошо согласуются (рис. 1, *а* и *б*), а относительная ошибка в пространственном распределении амплитуды (рис. 2, *а*) не превышает 2%.

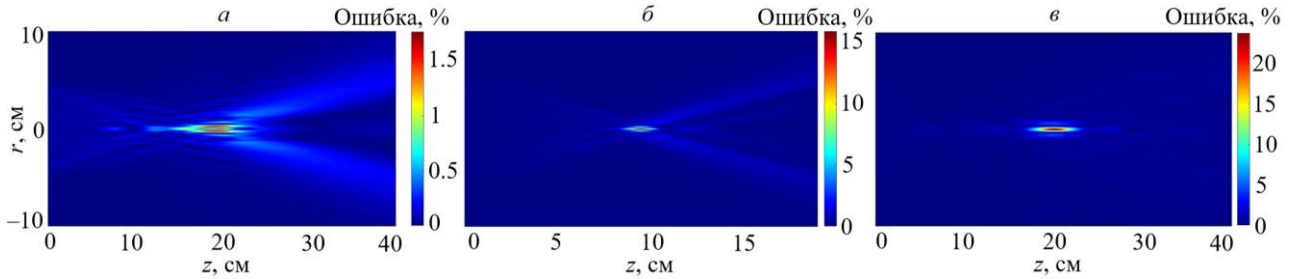


Рис. 2. Двумерные аксиальные распределения ошибок модели ХЗК относительно полного нелинейного ВУ для трех случаев: *а* – $F\#$ = 2, f_m/f_{dif} = 3.2; *б* – $F\#$ = 0.9, f_m/f_{dif} = 3.2; *в* – $F\#$ = 2, f_m/f_{dif} = 10.5.

На рис. 1, *а* также показаны результаты сравнения двух моделей для распределений амплитуды ВРЧ при усилении фокусировки (уменьшении $F\#$ с 2 до 0.9) при том же значении f_m/f_{dif}, а на рис. 1, *б* – при сохранении $F\#$ = 2 и увеличении f_m/f_{dif} с 3.2 до 10.5. В обоих случаях модель ХЗК (серая сплошная кривая) перестает количественно точно описывать поле ВРЧ в фокальной области: амплитуда давления ВРЧ в фокусе оказывается выше, а фокальная зона уже и короче по сравнению с решением ВУ (синяя штрихпунктирная кривая). Двумерные распределения относительной ошибки методов (рис. 2 *б*, *в*) демонстрируют, что расхождение между моделями сосредоточено преимущественно в фокальной зоне и достигает 15% при усилении фокусировки (уменьшении $F\#$ с 2 до 0.9) и почти 25% при уменьшении разностной частоты (увеличении f_m/f_{dif} с 3.2 до 10.5).

На рис. 3 представлены одномерные поперечные распределения амплитуды давления ВРЧ в фокальной плоскости для трех исследуемых случаев, полученные при решении полного ВУ с дополнительным учетом влияния локальной нелинейности по формуле (4).

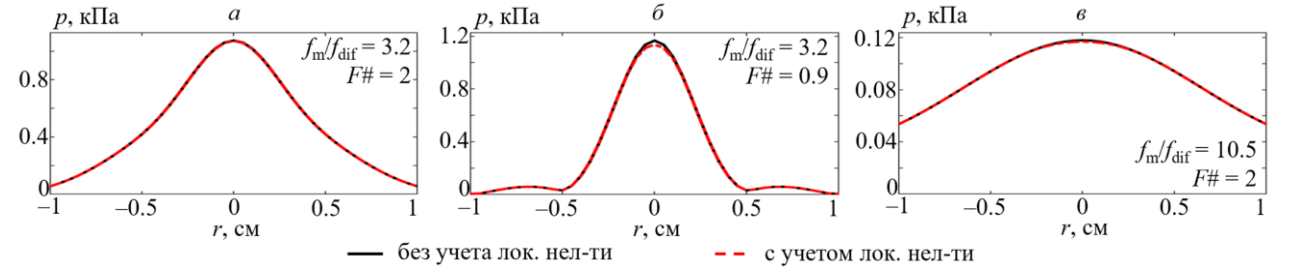


Рис. 3. Одномерные поперечные распределения амплитуды давления ВРЧ без (черные сплошные кривые) и с учетом влияния локальной нелинейности (красные штрихпунктирные кривые) для трех пар параметров задачи: *а* – $F\#$ = 2, f_m/f_{dif} = 3.2; *б* – $F\#$ = 0.9, f_m/f_{dif} = 3.2; *в* – $F\#$ = 2, f_m/f_{dif} = 10.5.

Анализ результатов показывает, что учет локальных нелинейных эффектов приводит к незначительному снижению амплитуды ВРЧ по сравнению с расчетом без их учета. При этом степень влияния локальной нелинейности зависит от степени фокусировки излучателя: чем меньше диафрагменное число $F\#$ (более сильная фокусировка), тем более заметен этот эффект. Отметим, что в случае, когда в задаче одновременно присутствует и сильная фокусировка, и высокие значения f_m/f_{dif}, локальные эффекты начинают оказывать бóльший эффект на амплитуду давления ВРЧ в фокальной области, и их учет становится необходимым для количественно точного описания поля ВРЧ в этой области.

Заключение

В работе реализован численный алгоритм решения полного нелинейного ВУ в квазилинейном приближении для моделирования эффектов параметрической генерации ВРЧ в поле бигармонического сферического излучателя с характерными для медицинских приложений параметрами. При сравнении результатов с однонаправленной параболической моделью уравнения ХЗК показано, что для задач с сильной фокусировкой ($F\# = 0.9$) и/или высоким значением отношения частот накачки к разностной частоте (коэффициент трансформации частоты, $f_m/f_{dif} = 10.5$) использование полного нелинейного ВУ, а также учет локальных нелинейных эффектов необходимы для получения количественно точных результатов расчета поля ВРЧ. Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 25-72-10071.

Список литературы

1. *Tian L., Zheng H., Xie W., Li F., Wang Z., Li Y.* Real time monitoring of tissue damage in HIFU focal region by ultrasonic excitation acoustic signal amplitude // Appl. Acoust. 2022. **41**, N 4. P. 520–526.
2. *Dash P.P., Arvanitis C.* Leveraging the parametric array effect for transcranial focused ultrasound interventions // ASA Meeting abstract. May 18-23, 2025.
3. *Сергеева М.С., Квашенникова А.В., Юлдашев П.В., Есипов И.Б., Хохлова В.А.* Моделирование параметрических эффектов в фокусированных осесимметричных ультразвуковых пучках при двухчастотном возбуждении излучателя // Сб. Тр. XXXVII сессии Рос. акуст. общ. ООО Издательство ГЕОС Москва, 2025. С. 811–817.
4. *Hamilton M.F., Blackstock D.T., eds.* Nonlinear Acoustics, 3rd ed. Springer Cham, Switzerland, 2024.
5. *Červenka M., Bednarik M.* An algebraic correction for the Westervelt equation to account for the local nonlinear effects in parametric acoustic array // J. Acoust. Soc. Am. 2022. **151**, N 6. P. 4046–4052.
6. *Росницкий П.Б., Юлдашев П.В., Высоканов Б.А., Хохлова В.А.* Граничное условие для расчета полей сильно фокусирующих излучателей на основе уравнения Хохлова–Заболотской // Акуст. журн. 2016. **62,** № 2. С. 153–162.
7. *Jing Y., Tao M., Clement G.T.* Evaluation of a wave-vector-frequency-domain method for nonlinear wave propagation // J. Acoust. Soc. Am. 2011. **129**, N 1. P. 32–46.
8. *Юлдашев П.В., Мездрохин И.С., Хохлова В.А.* Моделирование высокоинтенсивных полей сильно фокусирующих ультразвуковых излучателей с использованием широкоугольного параболического приближения // Акуст. журн. 2018. **64**, № 3. С. 318–329.

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39740

МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВЫХ РЕЖИМОВ ФОКУСИРОВКИ УЛЬТРАЗВУКА 128-ЭЛЕМЕНТНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЁТКОЙ В ВОЗДУХЕ

Юлдашев П.В.[1)*], Лапина А.В.[1)], Цысарь С.А.[1)], Сапожников О.А.[1)]
[1)] *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.;*
Тел.: +7 (495) 939-29-52
E-mail: [*]petr@acs366.phys.msu.ru

Ультразвук высокой интенсивности, генерируемый в газовых средах, находит применение в промышленности, например, в процессах пеногашения, сушки и др. Для реализации необходимого воздействия уровни акустического давления должны достигать 140 дБ и более, поэтому для концентрации энергии волны часто используются сфокусированные излучатели. При этом существенную роль играют нелинейные акустические эффекты, в результате которых в фокусе образуются ударные фронты. Для точного контроля положения фокуса перспективным способом является использование многоэлементных антенных решеток. В данной работе выполнено численное моделирование поля давления прототипа ультразвуковой воздушной решетки, сконструированного из 128 элементов с резонансной частотой 35.5 кГц, расположенных на сегменте сферической поверхности с радиусом кривизны около 44 см. Численная модель основывается на уравнении Вестервельта и многократно использовалась ранее для моделирования полей излучателей терапевтического ультразвука в медицине. Начальное распределение амплитуды и фазы волны на фундаментальной частоте для эволюционной волновой модели было получено экспериментальным путем методом акустической голографии и отражает реальную структуру излучаемого поля. Моделирование показало, что уровень положительного пикового давления в фокусе при максимальной безопасной мощности, подаваемой на элементы, может превышать 175 дБ, а в фокусе образуется развитый разрыв. Выполненная работа позволяет в рамках численной модели оптимизировать конструкцию подобных излучателей для достижения необходимых параметров поля давления. Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 25-12-00141.

Ключевые слова: уравнение Вестервельта, фокусированный ультразвук в воздухе, многоэлементные решетки

SIMULATION OF ULTRASOUND FOCUSING IN AIR BY A 128-ELEMENT ANTENNA ARRAY AT SHOCK-WAVE FORMING CONDITIONS

Yuldashev P.V.[1)*], Lapina A.V.[1)], Tsysar S.A.[1)], Sapozhnikov O.A.[1)]

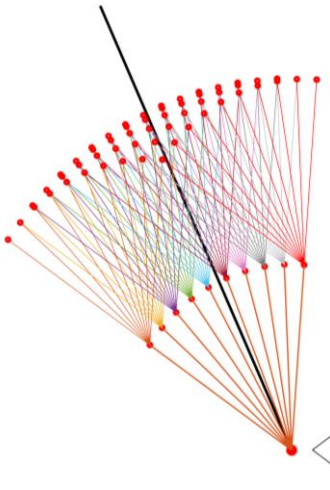
[1)] *Moscow State University, Moscow, 119991 Russia;*
E-mail: petr@acs366.phys.msu.ru

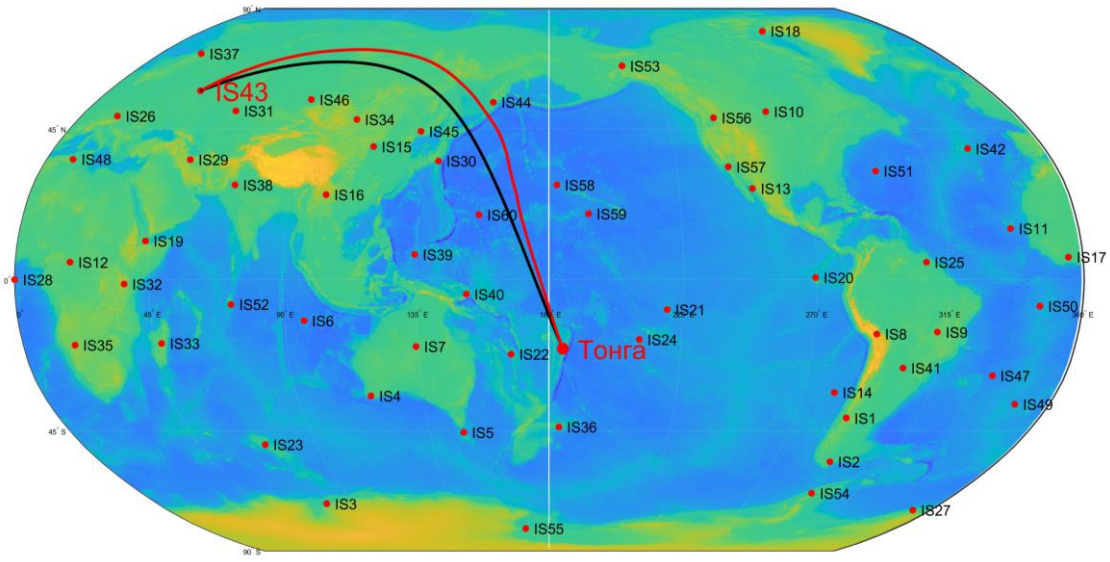
High-intensity ultrasound generated in gaseous media finds application in industry, for example, in defoaming and drying processes. To achieve the desired effect, acoustic pressure levels must reach 140 dB or more, therefore focused transducers are often used to concentrate the wave energy. Nonlinear acoustic effects play a significant role in this process, resulting in the formation of shock fronts at the focal point. Multi-element antenna arrays offer a promising method for precisely controlling the focal point position. This study numerically simulates the pressure field of a prototype ultrasonic air array constructed from 128 elements with a resonant frequency of 35.5 kHz, arranged on a spherical surface segment with a curvature radius of approximately 44 cm. The numerical model is based on the Westervelt equation and has been used previously to simulate the fields of therapeutic ultrasound transducers in medicine. The initial amplitude and phase distribution of the wave at the fundamental frequency for the evolutionary wave model was obtained experimentally using acoustic holography and reflects the actual structure of the emitted field. Simulations showed that the positive peak pressure level at the focal point, at the maximum safe power supplied to the elements, can exceed 175 dB, and a developed shock forms at the focal point. This work allows us to optimize the design of similar transducers within a numerical model to achieve the required pressure field parameters. This work was supported by Russian Science Foundation grant No. 25-12-00141.

Keywords: the Westervelt equation, focused ultrasound in air, multi-element arrays

Назад к содержанию секции

СЕКЦИЯ АТМОСФЕРНАЯ АКУСТИКА





назад к Содержанию

СОДЕРЖАНИЕ СЕКЦИИ АТМОСФЕРНАЯ АКУСТИКА

1.ПРИМЕНЕНИЕ ПРОЕКЦИОННОГО АЛГОРИТМА ДЛЯ ФИЛЬТРАЦИИ СИГНАЛОВ В МИКРОФОННЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТКАХ
Кутузов Н.А., Родионов А.А., Иваненков А.С. 1516

2.ИНФРАЗВУКОВОЙ МОНИТОРИНГА ИЗВЕРЖЕНИЯ ВУЛКАНА КРАШЕНИННИКОВА В 2025 ГОДУ
Будилов Д.И., Чунчузов И.П. Попов О.Е. 1522

3.АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПОМЕХ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ НА РАЗРЕШЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ С ПОМОЩЬЮ РЕШЕТОК МИКРОФОНОВ
Родионов А.А., Савельев Н.В.....1529

4.ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗМУЩЕНИЙ АТМОСФЕРЫ ПРИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗМУЩЕНИЙ АТМОСФЕРЫ ПРИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ
Курдяева Ю.А., Кшевецкий С.П., Перевалова Н.П. Куличков С.Н. 1535

5.ПРИМЕНЕНИЕ КОМПОЗИТНОГО ОСРЕДНЕНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СУБМЕЗОМАСШТАБНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ АПС ПО СОДАРНЫМ ДАННЫМ
Люлюкин В.С. Зайцева Д.В., Каллистратова М.А., Кузнецов Д.Д.....1541

6.МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА ИНФРАЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ ОТ ГРОЗОВОГО ФРОНТА
Снитковский М.В., Чуличков А.И., Закиров М.Н., Цыбульская Н.Д., Куличков С.Н. 1547

7.ГРАФОВЫЙ АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ ТРАЕКТОРИИ АКУСТИЧЕСКОГО ЛУЧА НА ПРИМЕРЕ ВУЛКАНА ХУНГА-ТОНГА-ХУНГА-ХААПАЙ
Закиров М.Н., Куличков С.Н. 1553

8.ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ЛОКАТОРОВ (СОДАРОВ) ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СУБМЕЗОМАСШТАБНЫХ СТРУКТУР В УСТОЙЧИВОМ АТМОСФЕРНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ
Зайцева Д.В., Каллистратова М.А., Люлюкин В.С., Кузнецов Р.Д., Кузнецов Д.Д. .1559

9.ПОСТРОЕНИЕ ЦВЕТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА МАКСИМАЛЬНО ПРАВДОПОДОБНОЙ КЛАССИФИКАЦИИ СИГНАЛОВ
Родионов А.А.....1562

10.МЕТОДОЛОГИЯ ПРИМЕНЕНИЯ БОЛЬШИХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ ПРИ СОЗДАНИИ ПРИКЛАДНЫХ РАСЧЁТНЫХ ПРОГРАММ В ОБЛАСТИ АТМОСФЕРНОЙ АКУСТИКИ
Красненко Н.П., Раков Д.С. 1568

11.СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ОТ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ТАЙВАНЕ В 2024 Г. МЬЯНМЕ И КАМЧАТКИ В 2025 Г.
Сорокин А.Г., Добрынин В.А., Ойнац А.В. 1576

12.ФУНКЦИОНАЛ ВОЛНОВОЙ ЭНЕРГИИ В ТЕОРИИ СЛАБЫХ РЕШЕНИЙ УРАВНЕНИЙ ЭЙЛЕРА ДЛЯ СТРАТИФИЦИРОВАННОГО ГАЗА
Кшевецкий С.П., Гаврилов Н.М. 1582

13.МЕТОДЫ ШУМОПОДАВЛЕНИЯ В АКУСТИЧЕСКИХ ДОПЛЕРОВСКИХ СОДАРАХ ОБЗОР АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ И СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ
Красненко Н.П., Рыбаков И.А.....1588

14.ФРОНТОВАЯ ОБЛАСТЬ ИМПУЛЬСНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ВОЛН В АТМОСФЕРНОЙ АКУСТИКЕ
Косяков С.И., Куличков С.Н. 1598

УДК: 534.8 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39741

Применение проекционного алгоритма для фильтрации сигналов в микрофонных антенных решетках

Н.А. Кутузов [1,a], А.А. Родионов[1], А.С. Иваненков[1]

[1] *Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук, Нижний Новгород, 603950*

E-mail: [a]nik-kutuzov@yandex.ru

Аннотация: Для решения задачи фильтрации помех и определения некорректных измерений при использовании микрофонной антенной решетки успешно применен оригинальный проекционный алгоритм, ранее апробированный в задаче поиска источников вибрации с помощью наборов вибродатчиков. Данный алгоритм, основанный на совмещении модельных и экспериментальных данных, позволяет находить приемники с аномалиями измерений различного типа. Подобные аномалии возникают из-за аппаратных неисправностей или существенного рассогласования используемой модели и принимаемого сигнала и, как правило, приводят к деградации алгоритмов обработки и неправильному решению обратной задачи. На практике при использовании микрофонных антенных решеток, применяемых в широком классе прикладных задач (акустической диагностики, атмосферной акустики и др.), возникает необходимость определять микрофоны с некорректными показаниями. В настоящей работе показано, что проекционный алгоритм позволяет качественно выполнять автокалибровку микрофонов с приемлемой вычислительной сложностью, при этом сохраняя за системой свойство работы в реальном времени. Кроме обнаружения возникающих аппаратных неисправностей микрофонов, алгоритм позволил осуществить фильтрацию помех (например, импульсных и ветровых) путем исключения из обработки части измерений. Применение алгоритма позволило упростить процедуру диагностики решеток и улучшить качество получаемых акустических изображений.

Ключевые слова: антенная решетка, проекционный метод, микрофонная решетка, обработка сигналов, отбор датчиков

Projection algorithm for filtering signals in microphone antenna arrays

N.A. Kutuzov [1,a], A.A. Rodionov[1], A.S. Ivanenkov[1]

[1] *Federal Research Center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, 603950*

E-mail: [a]nik-kutuzov@yandex.ru

Abstract: Filtering interference and identifying incorrect measurements when using a microphone antenna array solved by an original projection algorithm, previously tested in vibration source localization. This algorithm, based on a comparison of model and experimental data, allows to detect various types of measurement anomalies (outliers). Such anomalies are associated with sensor malfunctions or significant mismatches between the model used and the received experimental signal and can lead to the processing algorithms errors and an incorrect solution of the inverse problem. Microphone antenna arrays are used in a wide range of applications (acoustic diagnostics, atmospheric acoustics, etc.) and it is necessary to detect outliers. Proposed projection algorithm enables automatic microphone calibration and anomaly detection with acceptable computational complexity (for real-time applications). This algorithm is successfully applied for filtering out interference (pulse noise) by excluding some data from processing. As a result, the array diagnostic procedure and acoustic image quality are improved.

Keywords: Antenna array, projection algorithm, microphone array, signal processing, outlier detection

PACS: 02.30.Zz 43.28.-g

Введение

В настоящее время микрофонные антенные решетки (АР) находят применения в широком классе прикладных задач. Одной из областей их использования является построение акустических изображений – распределений в пространстве энергетических величин звукового поля [1]. Этот подход может применяться в задачах акустического мониторинга окружающей среды, диагностики и определения состояния различных систем (с целью нахождения зон повышенного шумоизлучения и дефекта). При использовании решеток возникает необходимость определять микрофоны с некорректными показаниями (аномалиями данных) [2]. Под аномалиями данных подразумеваются не только аппаратные неисправности приемников, но и наличие на части микрофонов ветровых и импульсных помех. В этом случае предварительная

калибровка не исключает того, что в процессе эксплуатации микрофоны начнут давать аномальные показания. Помеховые сигналы могут возникать в отдельной частотной полосе, на ограниченное время и не быть связанными с аппаратными неисправностями. В связи с этим возникает необходимость в программных механизмах автокалибровки с целью автоматического определения таких датчиков с приемлемой вычислительной сложностью, чтобы сохранить за системой свойство работы в реальном времени.

1 Модель сигнала и проекционный алгоритм

При обработке принятых на *K*-элементную микрофонную решетку акустических сигналов для *j*-ого временного отсчета после узкополосной фильтрации на частоте f_0 будем использовать следующую модель:

$$\mathbf{v}_j = \sum_{m=1}^{M} p_{jm}\mathbf{a}(\varphi_m, \theta_m) + \xi_j, \; j = 1 \ldots J, \tag{1}$$

где *M*– число источников плоских волн, p_{jm} – временная форма узкополосного сигнала *m*-го источника плоской волны, $\mathbf{a}(\varphi_m, \theta_m)$ – *K*x1 вектор направлений для плоской волны от *m*-ого источника с азимутом φ_m и углом места θ_m, ξ_j – временные отсчеты аддитивного шума, *J*–общее число отсчётов. В настоящей работе при построении акустических портретов для каждой частотной полосы и пеленга плоской волны будем использовать метод MUSIC

$$F_{music}(\varphi, \theta, f_0) = \frac{1}{\mathbf{a}(\varphi, \theta)^H \mathbf{U}\mathbf{U}^H \mathbf{a}(\varphi, \theta)}, \tag{2}$$

где $\mathbf{U}\mathbf{U}^H = \sum_{l=M+1}^{K} \mathbf{u}_l \mathbf{u}_l^H$, $\mathbf{u}_l$ – собственные векторы выборочной корреляционной матрицы принятого сигнала $\hat{\mathbf{K}} = \frac{1}{J}\sum_{j=1}^{J} \mathbf{v}_j \mathbf{v}_j^H$. Для построения акустического портрета в случае широкополосного сигнала может быть использован некогерентный широкополосный MUSIC, заключающийся в суммировании функций (2) по частотам f_0.

Для решения задачи автокалибровки и отбора приёмников воспользуемся проекционным алгоритмом [3]. Из векторов направлений $\mathbf{a}_i$ для каждого угла места и азимута составим *K*x*N* матрицу $\mathbf{M} = [\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, ..., \mathbf{a}_i, ..., \mathbf{a}_N]$, где $N = N_\varphi N_\theta$ – общее число рассчитываемых направлений прихода плоской волны. Матрица $\mathbf{T} = \mathbf{M}\mathbf{M}^H$ содержит *D*<*K* главных компонент. Через линейную комбинацию данных компонент выражается любая сумма плоских волн на АР. При наличии на микрофонах аномалий измерений

разложение векторов $\mathbf{v}_j$ в ортогональном базисе будет выполнено с существенной погрешностью. Отметим, что удаление подобных измерений позволит минимизировать рассогласование. Для начала определим «аномальные» микрофоны с использованием матрицы $\mathbf{T}$. Выполняя операции исключения каждого *k*-го микрофона из модели и из экспериментальных данных, получим *K* матриц $\mathbf{T}_k$ и *KxJ* векторов $\mathbf{v}_{jk}$. Для нахождения числа *D* будем использовать следующее отношение суммы D максимальных собственных чисел к сумме всех собственных чисел матрицы $\mathbf{T}_k : \sum_{w=1}^{D} \lambda_w / \sum_{w=1}^{K-1} \lambda_w > 0.99$. В дальнейшем будем считать, что собственные числа выстроены в порядке убывания. Оценку *D* для каждой частоты f_0 для случая плоских волн также можно приближенно найти как $D = L_w L_l$, где L_w, L_l – количества отрезков величиной в половину длины волны укладывающихся в ширину и длину планарной решетки (или только длину в случае линейной апертуры). Для каждого *k* находится

$$F_{sensor}(k) = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^{J} \frac{\mathbf{v}_{jk}^H \mathbf{v}_{jk}}{\mathbf{v}_{jk}^H \mathbf{C}\mathbf{C}^H \mathbf{v}_{jk}}, \tag{3}$$

где $\mathbf{C}\mathbf{C}^H = \sum_{d=D+1}^{K-1} \mathbf{c}_d \mathbf{c}_d^H$, $\mathbf{c}_d$ – собственные вектора матрицы $\mathbf{T}_k$, соответствующие $D+1 \le w \le K-1$ собственным числам λ_w. Функция (3) вычисляется для каждого микрофона в каждой частотной полосе и является мерой того, насколько «хорошо» векторы экспериментальных отсчетов без *k*-го микрофона лежат в пространстве *D* модельных главных компонент (при удалении «плохого» микрофона знаменатель (3) резко уменьшается). Выделяющиеся выбросы функции (3) можно определить с помощью абсолютного медианного отклонения. В этом случае номера микрофонов с некорректными показаниями определяются из условия:

$$F_{sensor}(k) > med[F_{sensor}(1..K)] + 3MAD \tag{4}$$

где $MAD = 1.48\, med(\left|F_{sensor}(1..K) - med[F_{sensor}(1..K)]\right|)$ Похожую операцию можно произвести и по отношению к временным отсчетам после селекции микрофонов по процедуре (4). Для этого будем использовать коэффициент корреляции $Kc(j) = \left| \frac{\bar{\mathbf{v}}_j^H \mathbf{P} \bar{\mathbf{v}}_j}{\left\| \bar{\mathbf{v}}_j \right\| \left\| \mathbf{P} \bar{\mathbf{v}}_j \right\|} \right|$, где $\bar{\mathbf{v}}_j$ – вектор отсчетов экспериментального сигнала после удаления микрофонов по процедуре (4), $\mathbf{P} = \mathbf{B}(\mathbf{B}^H \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^H$ – проектор на D главных

собственных вектора $\mathbf{B}=[\mathbf{b}_1...\mathbf{b}_D]$ матрицы $\overline{\mathbf{T}}$, полученной из матрицы $\mathbf{T}$ после удаления «плохих» микрофонов. Векторы временных отсчетов $\overline{\mathbf{v}}_j$, для которых коэффициент корреляции будет ниже заранее установленного порога *Th*, будем исключать из расчета выборочной корреляционной матрицы принятого сигнала. То есть для исключения отсчёта с индексом j должно выполняться условие

$$Kc(j) < Th. \quad (5)$$

2 Результаты апробации

С целью определения аномалий измерений на микрофонах был применен предложенный проекционный алгоритм. На 120 элементной эквидистантной плоской решетке (межэлементное расстояние 5 см, размер по осям 45 на 55 см) использование алгоритма позволило определить несколько микрофонов с аппаратными неисправностями (списки микрофонов, определенных алгоритмом и последующей «ручной» проверкой, согласуются). «Плохие» микрофоны определялись как в широкой полосе (по результатам суммирования функции (3) по полосам анализа), так и в узких полосах. На рис. 1 приведена функция селекции (3) до и после исключения двух микрофонов с возникшей аппаратной неисправностью (выделена на спектрограмме) на одной определенной частоте. Кроме устранения аппаратных неисправностей, алгоритм также позволил исключить из расчета акустического портрета моменты времени, связанные с высоком уровнем ветровой помехи. Исключение данных отсчетов проводилось по правилу (5) после устранения аппаратно неисправных микрофонов. Отметим, что «плохие» временные отсчеты, связанные с порывами ветра, имели низкое значение коэффициента корреляции по сравнению с другими отсчётами (см. рис. 2). Существенно улучшилось качество акустических портретов. На рис. 3 представлены акустические портреты до и после проведения отбора микрофонов (4) и фильтрации по времени (5) Как видно из результатов, на акустическом портрете появляются два источника с азимутами в 95 и 150 градусов.

Заключение

В настоящей работе для решения задач фильтрации помех и определения некорректных измерений при использовании микрофонной решетки успешно применен оригинальный проекционный метод. Устранение из расчета микрофонов с аппаратными неисправностями, а также фильтрация ветровых помех, позволили улучшить акустические портреты.

Работа выполнена в рамках госзадания ИПФ РАН по теме FFUF-2024-0040.

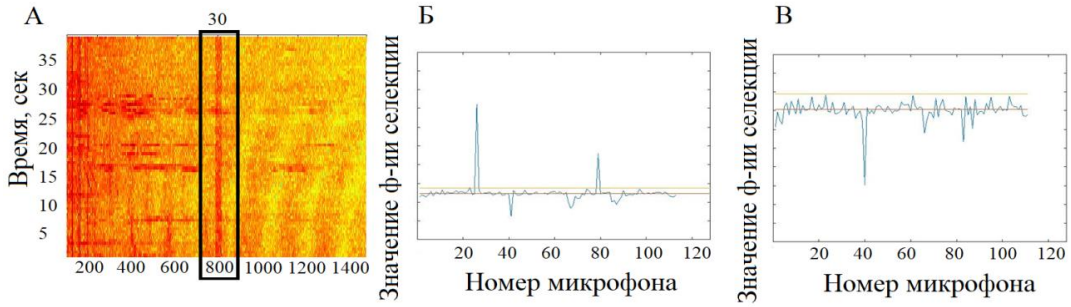


Рис.1. Удаление двух микрофонов с ошибкой измерений в полосе. А – спектрограмма сигнала с одного из микрофонов (№30), Б, В – функции 3 до и после удаления двух микрофонов. На Б,В линиями представлены медианное значение функции и медианное значение+3 медианных отклонения. На Б видны два максимума функции (3), превышающие med+3MAD и соответствующие микрофонам с неисправностью. После удаления, микрофонов, удовлетворяющих (4) нет – В.

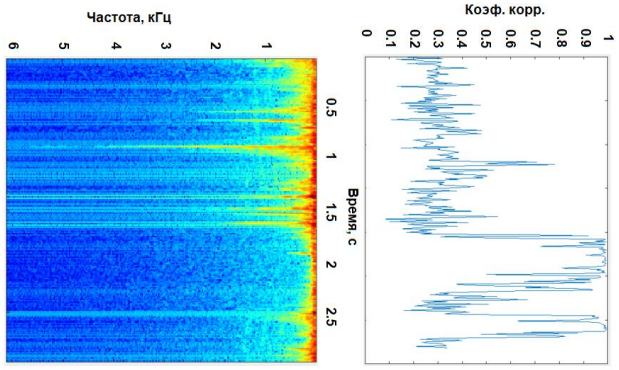


Рис.2.Слева – спектрограмма с ветровыми помехами, справа – коэффициент корреляции Кс в зависимости от времени на частоте 1 кГц. Моменты с низким Кс соответствуют моментам присутствия помех.

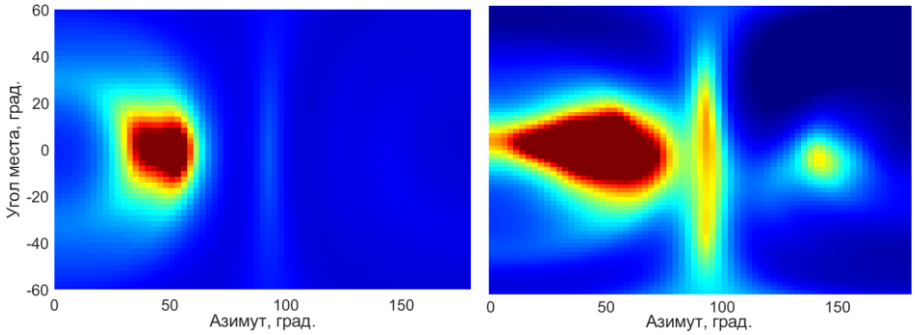


Рис.3. Акустический портрет до(слева) и после(справа) фильтрации проекционным алгоритмом.

Список литературы

1. Hou J. et al. A review for the noise source identification methods based microphone array // Journal of Vibroengineering. 2022. **24**, N 5 P. 983.
2. *Teh H., Wang K.* Sensor data quality: A systematic review // Journal of Big Data. 2020. **7**, N 11. P. 1.
3. *Кутузов Н.А., Родионов А.А.*Проекционный метод определения аномальных датчиков в задачах виброакустики // Журнал радиоэлектроники. 2024. N 12.

УДК: 534-6 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39742

Инфразвуковой мониторинг извержения вулкана Крашенинникова в 2025 году

Будилов Д.И. [1 а], Чунчузов И.П. [2], Попов О.Е. [2]

[1)] Камчатский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», Петропавловск-Камчатский

[2)]Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва.

E-mail: [а] budilovdmitriy@yandex.ru

Аннотация: В 2025 году на полуострове Камчатка произошло редкое геологическое событие: после мощного землетрясения магнитудой 8.8, зарегистрированного 30 июля, впервые за почти 600 лет (с 1463 года) активизировался вулкан Крашенинникова. Извержение началось 2 августа с выбросами пепла на высоту 3–6 км и лавовыми потоками. Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» зарегистрировал инфразвуковые сигналы на станциях инфразвукового мониторинга.

В докладе представлены результаты анализа инфразвуковых данных, полученных со станции IS44. По временам прихода инфразвуковых сигналов получено более точное время начала извержения вулкана Крашенинникова 16:26.1 – 16:30.1 UTC, которое оказалось на 10 минут раньше, чем это было найдено по данным спутникового мониторинга. Доклад подчеркивает значимость инфразвукового метода в вулканологии, особенно для спорадически активных вулканов Камчатки.

Ключевые слова: инфразвук, вулканизм, извержение, пепловая опасность

Infrasound Monitoring of the 2025 Eruption of Krasheninnikov Volcano

Budilov D.I. [1], Chunchuzov I.P. [3], Popov O.E. 3

[1)]*Kamchatka Branch of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Science, Petropavlovsk-Kamchatsky;*

[2)]*Federal State Budgetary Institution of Science A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics of the Russian Academy of Sciences, Moscow*

E-mail: [а] budilovdmitriy@yandex.ru

Abstract: In 2025, a rare geological event occurred on the Kamchatka Peninsula: following a powerful earthquake of magnitude 8.8 recorded on July 30, Krasheninnikov Volcano became active

for the first time in nearly 600 years (since 1463). The eruption began on August 2 with ash emissio ns reaching 3–
6 km in height and lava flows. The Kamchatka Branch of the Federal Research Center “Unified Ge ophysical Service of the Russian Academy of Sciences” recorded infrasound signals at infrasound monitoring stations.

The report presents the results of an analysis of infrasound data obtained from station IS44. B ased on the arrival times of infrasound signals, a more precise start time of the Krasheninnikov Volc ano eruption was determined: 16:26.1–
16:30.1 UTC. This time is 10 minutes earlier than what was identified using satellite monitoring dat a. The report emphasizes the significance of the infrasound method in volcanology, especially for sp oradically active volcanoes in Kamchatka.

Keywords: infrasound, volcanism, eruption, ash hazard

PACS: 43.20.Dd

Введение

Вулканический массив Крашенинникова расположен на территории Кроноцкого заповедника (54° 35′ 45″ с. ш., 160° 16′ 12″ в. д.), примерно в 200 километрах от города Петропавловска — Камчатского (рис. 1, *а, б*). Он локализован в пределах полигенной кальдеры диаметром ~9 км, генетически ассоциированной с региональной зоной тектонической ослабленности северо-восточного простирания. Кальдерная структура наложена на гетерогенный вулканический узел, сформированный полихронными вулканитами различного петрохимического состава.

Вулканическая постройка представлена конусами, морфологическая ось которых ориентирована в северо-восточном направлении. Абсолютная высота составляет 1857 м, относительная — около 850 м (рис. 1, *б*). Вершина Южного конуса осложнена кратером провального типа диаметром 800 м и глубиной ~140 м.

Северный конус отличается сложной телескопической морфоструктурой: его вершинная часть деформирована кальдерой ~2 км, в пределах которой развит вторичный (Северный средний) конус. В эксплозивном кратере последнего зафиксирована экструзивная постройка — лавовый конус «Паук». [1] Уникальность вулкана Крашенинникова определяется наличием редкой телескопической кратерной системы.

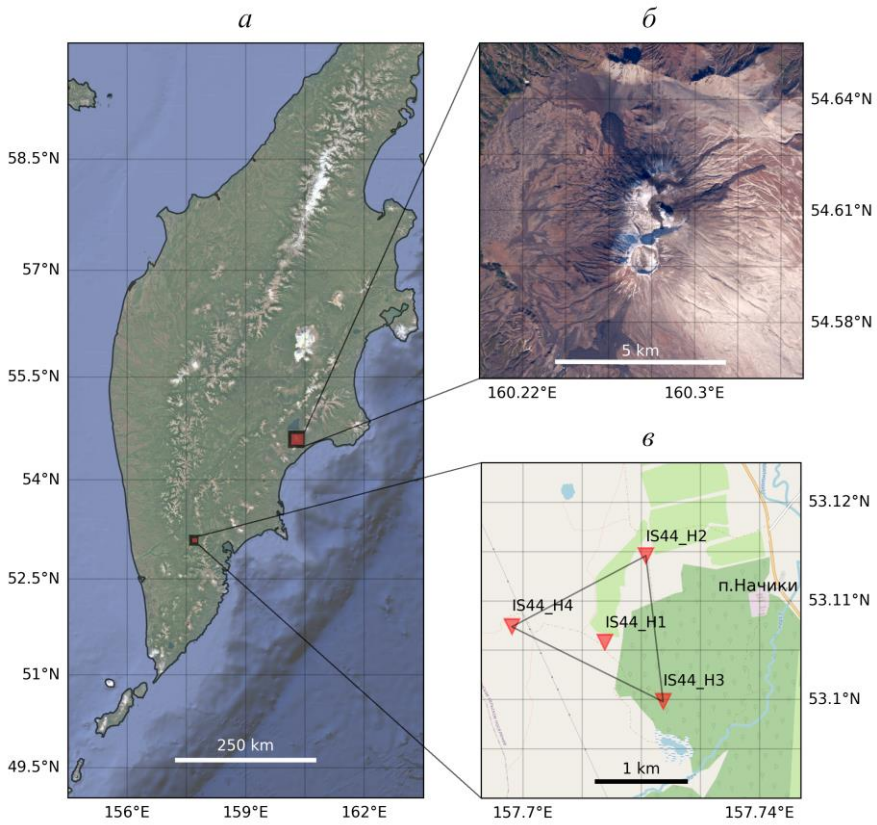


Рис. 1 *а* — расположение вулкана Крашенинникова и станции IS44 на полуострове Камчатка; *б* — вулкан Крашенинникова; *в* — станция IS44.

Первое историческое извержение вулкана Крашенинникова началось 02 августа 2025 года, в 16:38 UTC по данным спутникового мониторинга [2]. Оно было спровоцировано серией землетрясений на Камчатке, включая мощное землетрясение 30 июля 2025 г. магнитудой около 8,8 [3]. Извержение началось серией взрывов на вершине Северного Конуса, изверженный столб достигал высоты 6 км над уровнем моря. На спутниковых снимках, полученных через информационную систему VolSatView, наблюдались крупная термальная аномалия и пепловые шлейфы [2]. Извержение характеризовалось выбросами пепла на высоту до 6–8,5 км над уровнем моря и излиянием лавы. По данным Н.С. Акбировой (Кроноцкий заповедник), утром 3 августа (по местному времени) открытие трещины на вулкане сопровождалось громким ревом и сильными подземными толчками. Взрывная активность вулкана продолжалась до середины августа вдоль зоны трещин, простирающейся через кратер Среднего Конуса к северному вентиляционному отверстию. Лава изливалась внутри кратера и из небольшого вентиляционного отверстия на его южном краю. К концу августа протяжённость лавовых потоков достигла 10 км. [4]. В период активной фазы на станции IS44 были зарегистрированы множественные инфразвуковые сигналы.

Станция IS44

IS44 — инфразвуковая станция международной системы мониторинга (IMS) Организации по Договору о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (СТВТО). Расположена на полуострове Камчатка, в районе посёлка Начики (рис. 1 а, в) [5]. IS44 регистрирует низкочастотные звуковые волны, которые могут возникать при крупных взрывах. Эти станции способны фиксировать сигналы на больших расстояниях и помогают определять их источник. Основными компонентами станции являются: микробарографы индукционного типа MB2000, с рабочим диапазоном: 0.01–5 Гц.

Результаты анализа инфразвуковых данных

На рис.2 представлены флюктуации давления, зарегистрированные микробарографом (далее - приемником) станции IS44 и его спектрограмма. Красной линией отмечено появление широкополосного сигнала - начало извержения вулкана Крашенинникова.

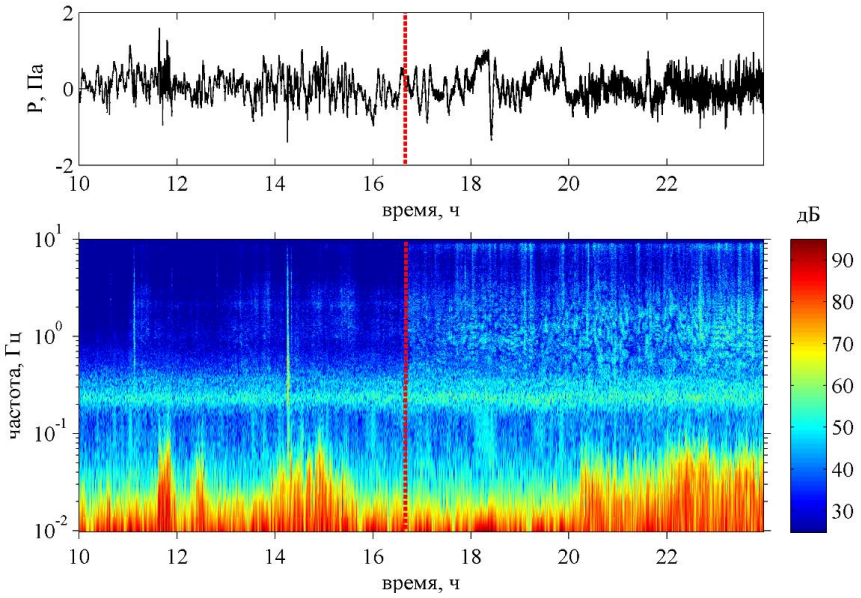


Рис. 2 Вверху флюктуации давления, зарегистрированные приемником станции IS44, а внизу – спектрограмма. Красная линия – начало извержения вулкана Крашенинникова в 16:40 2 августа 2025г UTC. Спектральная полоса 0.2-0.3 Гц – микробаромы.

Если ориентироваться на появление и постепенное усиление спектральных компонент в диапазоне частот 0.4-8.5 Гц, то можно считать, что инфразвуковой сигнал от извержения вулкана Крашенинникова пришел на приемники IS44 примерно в интервале 16:38 – 16:42 UTC 2 августа 2025г. Чтобы найти время начала извержения надо учесть время распространения сигнала от вулкана до приемников станции. При расстоянии от приемника №1 IS44 до вулкана примерно 236 км и скорости звука около 330 м/с время распространение будет около 11.92 мин. Тогда можно считать, что извержение началось в интервале 16:26.1 – 16:30.1 UTC.

В [2] по данным спутникового мониторинга термальной аномалии и наличия пеплового облака определено начало извержения вулкана Крашенинникова примерно в 16:38 2 августа 2025 г., что сравнительно близко к полученному нами времени извержения по

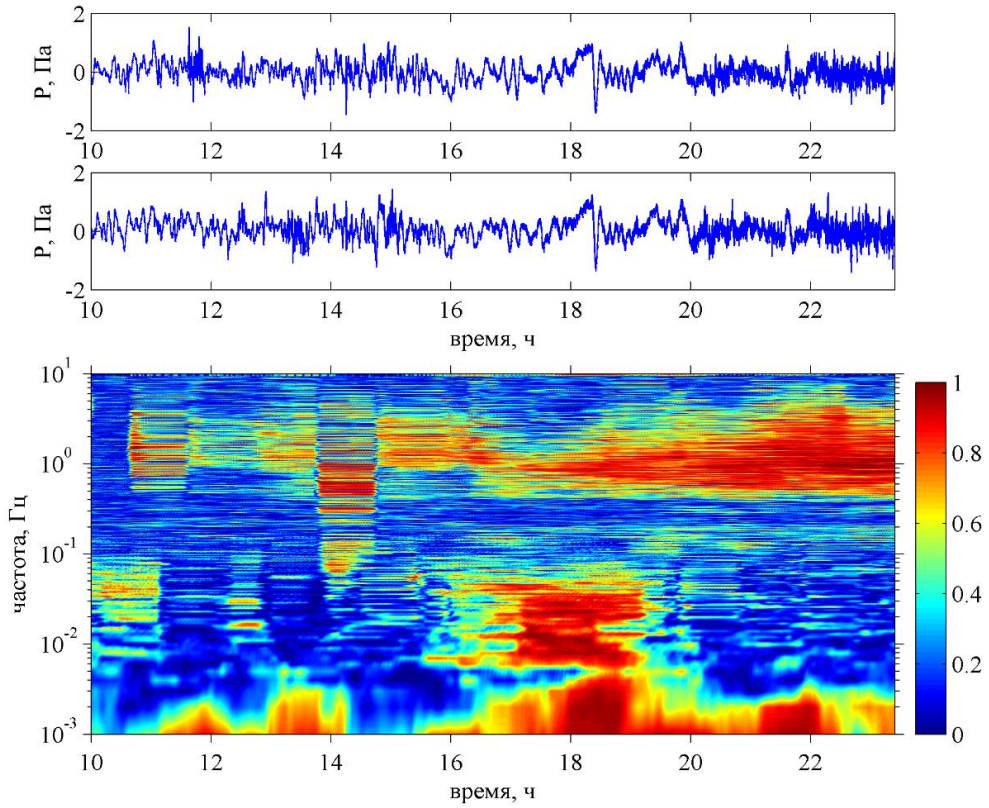


Рис. 3 Вверху сигналы приемников №1 и №2 IS44. Внизу – когерентность этих сигналов.

сигналам приемников, но примерно на 10 минут позже, что объяснимо в связи с не непрерывным спутниковыми наблюдениями. На рис 3 представлены сигналы двух приемников IS44 и их когерентность. Устойчиво высокая когерентность после начала извержения вулкана Крашенинникова наблюдается в двух диапазонах примерно 0.006 - 0.046 Гц и 0.44-3.6 Гц. Согласно [7] “импульсные акустические сигналы, воздушные ударные волны в диапазоне частот 1÷10 Гц, генерируются нестационарными процессами в кратерной зоне во время дегазации магмы при ее поступлении на дневную поверхность”.

На рис. 4 представлены графики азимутов и горизонтальных фазовых скоростей приходов инфразвуковых сигналов в диапазоне частот 1-2 Гц в течении 13 часов.

Расчет азимутов и горизонтальных фазовых скоростей проводился по стандартной методике на основе расчета задержек прихода сигналов на пары приемников в рамках модели распространения волны с плоским фронтом по сигналам приемников № 2, 3 и 4 IS44 рис.1 в. Можно отметить наличие двух выраженных азимутов приходов. Пурпурной линией показан азимут от приемника №1 IS44 на вулкан Ключевская сопка 28.62**º**, а красной на вулкан Крашенинникова 44.47º. В начале, примерно с 11:03 надежно определяется азимут на вулкан

Ключевская сопка, а примерно с 16:41 азимут на вулкан Крашенинникова. Сигнал вулкана Крашенинникова постепенно нарастает рис.4 и начинает превышать сигнал от вулкана Ключевская сопка и мы наблюдаем переход азимута с вулкана Ключевская сопка на вулкан

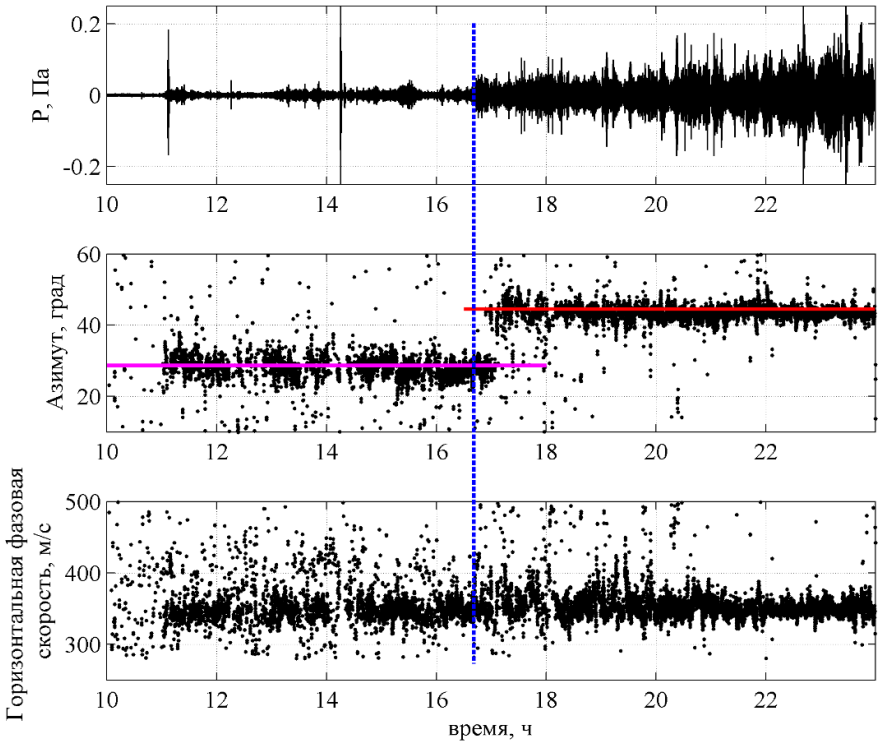


Рис. 4 Вверху сигнал приемника №1 IS44 в полосе частот 1-2 Гц. В середине азимут на источник сигнала и внизу горизонтальная фазовая скорость. Синяя линия – начало прихода инфразвукового сигнала от извержения вулкана Крашенинникова. Пурпурная линия – азимут от IS44 на вулкан Ключевская сопка, красная линия – азимут на вулкан Крашенинникова, вычисленные по координатам.

Крашенинникова. Важно отметить, что расстояние от IS44 до вулкана Крашенинникова примерно 236 км, тогда как вулкан Ключевская сопка значительно дальше - 380 км. При определенных условиях распространения инфразвуковых сигналов такая разность в расстояниях при примерно одинаковой активности вулканов может приводить к заметному превышению сигналов от вулкана Крашенинникова над сигналами вулкана Ключевская сопка. Для более тонких интерпретаций и оценки распространения инфразвуковых сигналов необходимо проводить расчеты для профилей эффективной скорости звука.

Заключение

По временам прихода инфразвуковых сигналов получено более точное время начала извержения вулкана Крашенинникова, которое оказалось на 10 минут раньше, чем это было найдено по данным спутникового мониторинга. Наблюдался эффект перехода азимута, оцененного по инфразвуковым сигналам, с вулкана Ключевская сопка на вулкан

Крашенинникова, что было вызвано началом извержения вулкана Крашенинникова, находящегося почти в два раза ближе к станции IS44.

Работа была частично поддержана грантом РНФ № 25-17-00060 (раздел по корреляционному анализу сигналов).

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00604-25) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (https://ckp rf.ru/usu/507436/, http://www.gsras.ru/unu/**)**.

Список литературы

1. *Ponomareva V. V.* The history of Krasheninnikov volcano and the dynamics of its activity // Journal of Volcanology and Seismology. 1990. **Vol. 9**, No. 5. P. 714–741.
2. *Гирина О.А., Мельников Д.В., Романова И.М., Маневич А.Г.,* Крашенинникова Ю.С., *Сорокин А.А., Крамарева Л.С., Марченков В.В.* Первое историческое извержение вулкана Крашенинникова (Камчатка) в 2025 г. по данным спутникового мониторинга в информационной системе VolSatView. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. **Т. 22**. №4. С. 397–404
3. *Чебров Д.В.* Камчатское мега-землетрясение 29 июля 2025 г. (mw = 8.8) // Вестник краунц. Науки о земле. 2025. **№ 3**. Выпуск № 67 С. 113-117
4. *Gorbacha N. V. , Ozerova A. Yu. , Rogozina A. N. , Tolstykhb M. L., Ovsyannikova G. N.* , First Historical Eruption of Krasheninnikov Volcano (Eastern Kamchatka): Field Observations and Composition of Lavas Erupted in August–September 2025 // Journal of Volcanology and Seismology, 2026, **Vol. 20**, No. 1, pp. 1–14.
5. https://www.ctbto.org/
6. *Alcoverro B, Martysevich P, Starovoit Y.* Mechanical Sensitivity of Microbarometers MB2000 (DASE, France) and Chaparral 5 (USA) to Vertical and Horizontal Ground Motion. // Inframatics, 2005, V**ol. 9**, pp. 1–10
7. *Фирстов П. П.* Вулканические акустические сигналы диапазона 1.0-10 Гц в атмосфере и их связь с эксплозивным процессом. Петропавловск-Камчатский, КГПУ, 2003.

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39743

Анализ влияния помех различных типов на обнаружение акустических источников с помощью решеток микрофонов

А.А. Родионов [a], Н.В.Савельев [b]

ИПФ РАН, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

E-mail: [a]alexr@ipfran.ru, [b]saveliev@ipfran.ru

Аннотация: В работе рассматривается возможность использования плоских разреженных антенных решеток для обнаружения источников звука на фоне помех. Особенностью данной работы является сравнение эффективности антенны при наличии фоновой акустической помехи и независимого на элементах шума. Анализ качества работы антенных решеток производился с использованием вероятностных характеристик. С помощью численного моделирования показано, что для коррелированной помехи возможно уменьшение числа используемых элементов антенны без существенных потерь в эффективности при обнаружении и пеленгации источника звука.

Ключевые слова: разреженная антенная решетка, коррелированный шум, обнаружение источников звука.

Analysis of the effect of various types of interference on the detection of acoustic sources using microphone arrays

A.A. Rodionov[a], N.V. Savelev[b]

IAP RAS, 46 Ul'yanov Street, Nizhny Novgorod, 603950, Russia

E-mail: [a]alexr@ipfran.ru, [b]saveliev@ipfran.ru

Abstract: The paper considers the possibility of using sparse planar antenna arrays for the problem of detecting sound sources against a background of interference. A special feature of this work is the comparison of antenna efficiency in the presence of background acoustic interference and element-independent noise. The analysis of the quality of the antenna arrays was carried out using probabilistic characteristics. Numerical modeling has shown that for correlated interference, it is possible to reduce the number of antenna elements used without significant losses in efficiency in detecting and locating the sound source.

Keywords: sparse antenna array, correlated noise, detection of sound sources

PACS: 84.40.Ba, 05.40.Ca

Введение

Микрофонные антенные решетки (АР) широко применяются в различных областях, включая создание акустических изображений – карт пространственного распределения энергии звукового поля. Одним из примеров служит диагностика механоакустических систем, где необходимо локализовать источники повышенного шума. Для эффективного построения таких изображений предпочтительны планарные (плоские) АР. Однако классические решетки, состоящие из сотен или тысяч приемных элементов, расположенных с равным шагом, требуют дорогостоящей аппаратуры для сбора данных. В связи с этим возникает вопрос: можно ли уменьшить количество элементов в решетке, сохранив ее габариты и рабочую длину волны, не ухудшая при этом точность локализации источников звука? Решение этой проблемы видится в применении разреженных неэквидистантных АР, что и является одним из предметов настоящего исследования. На точность локализации источников и разрешения двух или более источников влияют различного рода помехи. В качестве таковых могут выступать собственные шумы, которые обычно независимы на приемных элементов. Также обычно присутствуют различного рода внешние помехи, отчеты которых на микрофонах могут быть коррелированны. Например, можно говорить о фоновом изотропном акустическом шуме, порождаемом большим количеством случайных внешних источников звука. Такой сценарий нередко реализуется на практике. В связи с этим актуальной является задача исследования возможности использования плоских разреженных антенных решеток применительно к задаче обнаружения источников звука на фоне помех различного типа. В работе будут рассматриваться два упомянутых выше вида помех: независимый белый гауссов шум и коррелированная акустическая помеха. Сравнение разреженных и заполненных антенных решеток в задачах обнаружения и разрешения сигналов будет произведено с помощью вероятностных характеристик.

1 Построение разреженной неэквидистантной антенны

Для построения разреженных АР будем использовать подход, который был впервые предложен в работе [1] и впоследствии адаптирован для плоских антенных решеток в исследованиях [2,3]. Далее приводится его краткое описание.

Пусть имеется плоская антенная решетка, расположенная в плоскости xOy, с размерами D_x и D_y вдоль осей Ox и Oy. Обозначим через N_x и N_y число приемных элементов вдоль соответствующих осей. Тогда общее количество элементов в решетке равно произведению $N_x N_y$.

Далее всю решетку разбиваем на подрешетки, каждая из которых содержит U_x элементов по оси Ox и U_y по оси Oy. В каждом таком подрешетке случайным образом выбираем и оставляем только один элемент. В результате формируется, как правило, неэквидистантная

антенная решетка, состоящая из $N_x N_y / (U_x U_y)$ элементов. Тогда координаты *nm*-ого приемного элемента будут иметь следующую запись:

$$x_{nm} = \frac{\lambda_0}{2}\left(U_x n - 1 + \varepsilon_{nm}\right), \quad n = 1,\ldots, N_x / U_x,$$

$$y_{nm} = \frac{\lambda_0}{2}\left(U_y m - 1 + \delta_{nm}\right), \quad m = 1,\ldots, N_y / U_y,$$

где величины ε_{nm}, δ_{nm} равновероятно принимают значения 0 или 1, $\frac{\lambda_0}{2} = d$ – межэлементное расстояние вдоль осей. На следующем этапе из множества реализаций случайных антенн осуществляется выбор единственного варианта с помощью критерия минимума $\text{УБЛ}_{\max}$, подробно описанного в работах [1–3]. Иллюстрация алгоритма этого отбора для $N_x = 12, N_y = 10, U_x = 2, U_y = 2$ представлена на рисунке 1.

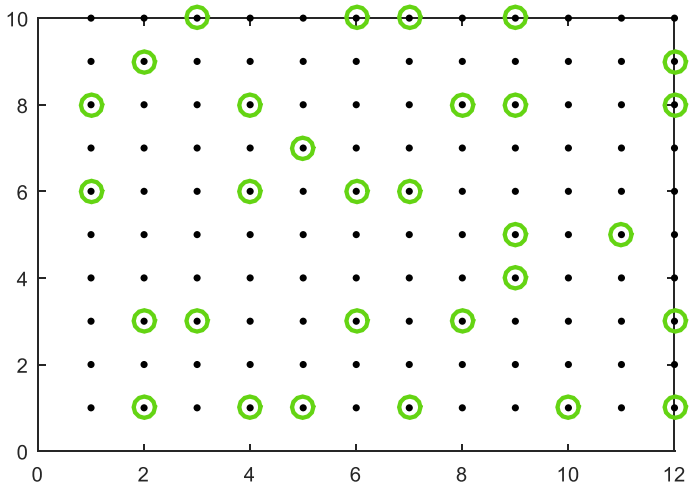


Рис. 1. Отбор элементов для разреженной АР

Черными точками обозначены положения заполненной АР, зелеными кружками – результат отбора по принципу минимума $\text{УБЛ}_{\max}$.

2 Исследование качества синтеза разреженных неэквидистантных антенн

Пусть плоская АР принимает сигнал в виде плоской волны. Отчеты сигнала на каждом элементе будут представлять собой сумму полезного сигнала и шума. Качество синтеза разреженных неэквидистантных АР будем характеризовать вероятностью обнаружения и оценки P_{de} [1]. На практике обычно используют вероятность в виде 1-P_{de}. На рис. 2 представлена зависимость этой вероятности от отношения сигнал/шум (ОСШ) для случая белого гауссова шума (БГШ) с нулевым средним и единичной корреляционной матрицей.

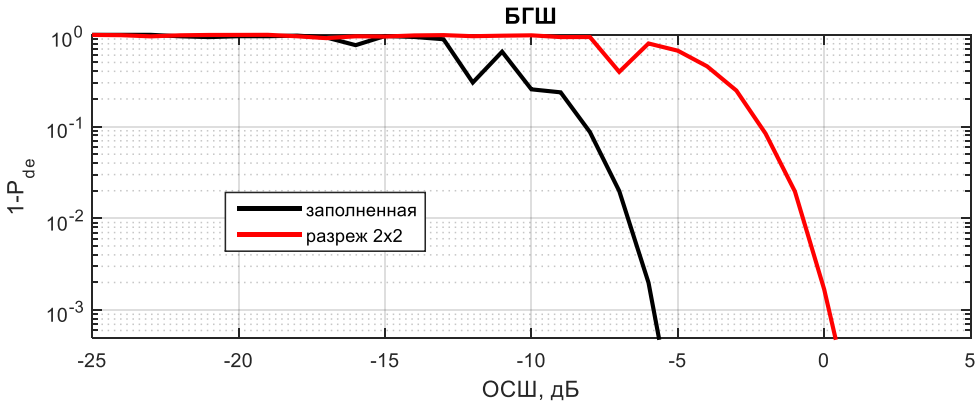


Рис. 2. Вероятность 1-P_{de} в зависимости от ОСШ для случая БГШ

Черной кривой показана зависимость для заполненной АР (рис. 1, черные точки), красной – для разреженной АР с $U_x = 2, U_y = 2$. То есть по каждому направлению число приемников было уменьшено в 2 раза. В итоге общее число элементов уменьшилось в 4 раза. Будем считать, что нужное значение вероятности обнаружения и оценки составляет 0.99, тогда 1-$P_{\text{de}} = 10^{-2}$. При таком предположении из рис. 2 видно, что разница пороговых значений ОСШ для заполненной и разреженной антенн составляет около 6 дБ. Такое значение получается за счет уменьшения количества элементов в 4 раза ($10\lg 4 \approx 6$), т.е. согласно формуле $10\lg\left(N_0/N\right)$, где N_0 – количество элементов.

Далее рассмотрим случай, когда в качестве помехи выступает фоновая изотропная акустическая помеха. Известно, корреляционная матрица такой помехи имеет вид [4]

$$\mathbf{K} = \sigma^2 \left\| \frac{\sin kd_{nm}}{kd_{nm}} \right\|, \tag{1}$$

где σ^2 – мощность помехи, k – волновое число, d_{nm} – расстояние между элементами с номерами n и m. Заметим, что для случая линейной эквидистантой антенны выполняется равенство $d_{nm} = d(n-m)$, где d – межэлементное расстояние. Если положить $k = k_0/2$, то $\lambda = \lambda_0/2 = d$. Тогда выражение (1) можно переписать в следующей форме

$$\mathbf{K} = \sigma^2 \left\| \frac{\sin 2\pi(n-m)}{2\pi(n-m)} \right\|_{n,m=\overline{1,N}} \equiv \sigma^2 \mathbf{I},$$

где $\mathbf{I}$ – единичная матрица. Другими словами отчеты помехи на элементах становится независимы. На рис. 3 представлена зависимость величины 1-P_{de} от ОСШ для данного случая при обнаружении узкополосного сигнала на частоте, соответствующе длине волны $\lambda = \lambda_0/2$. Подсчет выполнен для линейной эквидистантой и разреженной АР со степенью

разреженности U=2. Количество элементов составляло N_0=20 для заполненной АР, N=10 – для разреженной.

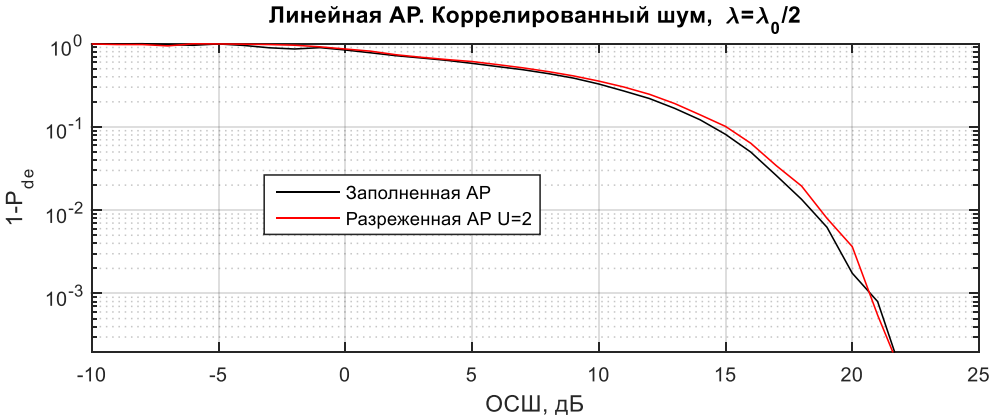


Рис. 3. Вероятность 1-P_{de} (обратная вероятность обнаружения и оценки) в зависимости от ОСШ для линейной АР и при наличии коррелированной помехи

Видно, что для указанной ситуации величина 1-P_{de} одинакова для линейной заполненной и разреженной в 2 раза антенн.

При исследовании плоских АР выражение (1) при $\lambda = \lambda_0/2$ и одинаковом межэлементном расстоянии вдоль перпендикулярных направлений переходит в выражение

$$\mathbf{K} = \sigma^2 \left\| \frac{\sin 2\pi\sqrt{2|(n-m)|}}{2\pi\sqrt{2|(n-m)|}} \right\|_{n=\overline{1,N_x};m=\overline{1,N_y}}.$$

Таким образом, помеха остается коррелированной. На рис. 4 представлена зависимость вероятности 1-P_{de} от ОСШ.

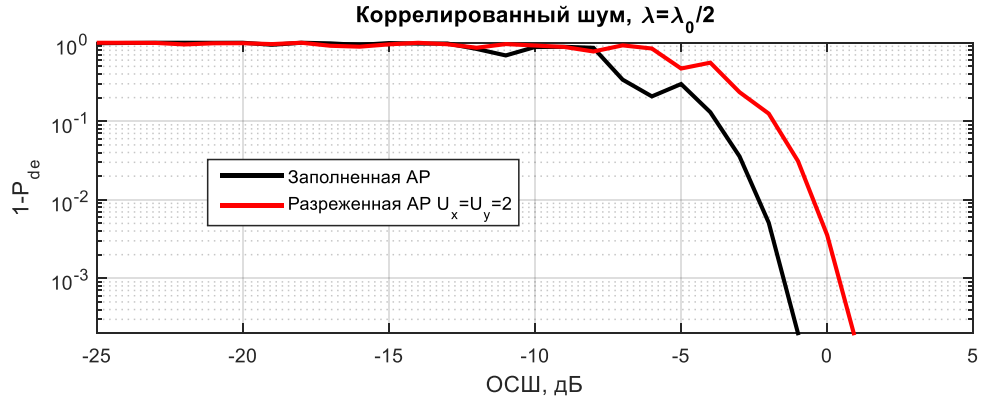


Рис. 4. Вероятность 1-P_{de} в зависимости от ОСШ для планарной АР и при наличии коррелированной помехи

Черной кривой показана зависимость для заполненной АР, красной – для разреженной АР с $U_x = 2, U_y = 2$. Видно, что разница в пороговых ОСШ составляет примерно 2 дБ. Таким образом, при увеличении ОСШ всего на 2 дБ, количество элементов АР можно уменьшить в 4 раза, сохранив при этом вероятность обнаружения и оценки.

Заключение

В работе приведены результаты использования плоских разреженных антенн в задачах обнаружения звука на фоне 2 видов помех. При наличии независимой на элементах помехи в виде белого гауссова шума показано, что пороговое ОСШ увеличивается на величину $10\lg N_0/N$. При наличии коррелированной помехи при обнаружении сигнала с длинной волны равной межэлементному расстоянию, пороговое ОСШ возрастает всего на 2 дБ при уменьшении количества элементов в 4 раза.

Работа выполнена в рамках госзадания ИПФ РАН по теме FFUF-2024-0040.

Список литературы

1. *Турчин В.И., Родионов А.А.* Обнаружение и пеленгация источников с использованием разреженных антенных решеток // Изв. Вузов. Радиофизика, 2018. Т. 61. № 2. С. 122–140.

2. *А.А. Родионов, Н.В. Савельев* Синтез планарных разреженных антенных решеток для обнаружения и пеленгации // Изв. вузов. Радиофизика. 2024. Т. 67, № 3. С. 236–245.

3. *А.А. Родионов, Н.В. Савельев* Построение акустических изображений с помощью сверхразрешающих методов с использованием неэквидистантных планарных антенных решеток // Акустический журнал, 2025, том 71, № 1, с. 58–66.

4. *Евтютов А.П., Колесников А.Е., Корепин Е.А. и др.* Справочник по гидроакустике. Л.: Судостроение, 1988. – 552 с.

УДК: **551.511.3, 551.511.31** DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39744

Численное моделирование возмущений атмосферы при землетрясениях

Ю.А. Курдяева[1,а], С..П. Кшевецкий[2, б] , *Н.П. Перевалова[3,в], С.Н. Куличков[4,г]*

[1] *Калининградский филиал Института Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Калининград, 236035 Россия*
[2] *Балтийский федеральный университет им.И.Канта, Калининград, Россия, 236040*
[3] *Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, 664033, Россия*
[4] *Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, Москва, 119017, Россия*
E-mail: [а]yakurdyaeva@gmail.com, [б]SPKshev@gmail.com, [в]pereval@iszf.irk.ru, [г]snik1953@gmail.com

Аннотация: Исследуются математические аспекты моделирования атмосферных волн, генерируемых землетрясениями. На примере сейсмических событий в Японии (2011) и Турции (2023) проведено двумерное моделирование с использованием численной модели AtmoSym. Алгоритмы AtmoSym позволяют детально описывать как распространение, так и нелинейное обрушение волн с последующим переходом в турбулентность. Проанализирована роль фоновых условий и статической устойчивости атмосферы; проведено сопоставление теоретических данных с результатами наблюдений.

Ключевые слова: акустико-гравитационные волны, землетрясение, численное моделирование, верхняя атмосфера, ионосфера

Numerical Modeling of Atmospheric Disturbances Induced by Earthquakes

IYu.A. Kurdyaeva[1]'[a], S.P. Kshevetskii[2]'[b], N.P. Perevalova[3]'[c], S.N. Kulichkov[4]'[d]

[1] *Kaliningrad Branch of the IZMIRAN (Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation), Russian Academy of Sciences, Kaliningrad, 236035 Russia*
[2] *Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, 236041 Russia*
[3] *Institute of Solar-Terrestrial Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, 664033 Russia*
[4] *A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119017 Russia*
E-mail: [a]ayakurdyaeva@gmail.com, [b]SPKshev@gmail.com, [c]pereval@iszf.irk.ru, [d]snik1953@gmail.com

Abstract: The paper investigates mathematical aspects of modeling atmospheric waves generated by earthquakes. Two-dimensional simulations of seismic events in Japan (2011) and Turkey (2023) were conducted using the AtmoSym numerical model. The AtmoSym algorithms provide a detailed description of both wave propagation and nonlinear wave breaking with subsequent transition to turbulence. The role of background conditions and static atmospheric stability is analyzed; the obtained theoretical data are compared with existing observational results.

Keywords: acoustic-gravity waves, earthquake, numerical modeling, upper atmosphere, ionosphere

1 Введение

Исследование литосферно-атмосферно-ионосферных связей является одной из наиболее динамично развивающихся областей физики атмосферы. Сильные сейсмические события с магнитудой $M>7.0$ сопровождаются значительными вертикальными смещениями земной поверхности, которые действуют на вышележащие слои атмосферы подобно поршню. В результате этого процесса генерируются акустико-гравитационные волны (АГВ), способные распространяться до высот термосферы и ионосферы.

Из-за экспоненциального падения плотности атмосферы с высотой амплитуда этих волн многократно возрастает. На высотах 200–400 км они достигают скоростей в сотни метров в секунду и вызывают вариации плотности нейтрального газа до десятков процентов. В ионосфере такие возмущения трансформируются в перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ), которые фиксируются наземными сетями GPS/GNSS как вариации полного электронного содержания (ПЭС).

Для адекватного описания таких процессов требуется решение полных нелинейных уравнений гидродинамики. Одной из ключевых проблем является учет реальной стратификации атмосферы, которая может содержать зоны статической неустойчивости, способные радикально менять волновую картину. В данной работе на примере катастрофических землетрясений в Японии (Тохоку, 11.03.2011) и Турции (06.02.2023) исследуется трансформация волнового поля при прохождении различных слоев атмосферы с использованием численной модели высокого разрешения.

2 Численная модель и постановка задачи

2.1 Особенности модели AtmoSym

В работе применяется численная модель нейтральной атмосферы высокого разрешения AtmoSym. В отличие от многих упрощенных моделей, AtmoSym является

неквазистатической и полностью нелинейной. Она базируется на конечно-разностной схеме типа «крест» с неявной аппроксимацией на первом полушаге, что минимизирует вычислительную вязкость и обеспечивает высокую устойчивость решения даже в условиях обрушения волн (р. 3).

Алгоритмы модели гарантируют строгое выполнение фундаментальных законов сохранения массы, импульса и энергии, а также закона неубывания энтропии. Это критически важно для корректного описания диссипации волновой энергии и ее перехода в тепловую при возникновении турбулентности. Расчетная область по вертикали простирается до 600.0 км. Шаг сетки по горизонтали составляет 1.0 км, а по вертикали используется адаптивный шаг: от 0.05 км в приземном слое до 0.51 км на больших высотах (р. 5).

2.2 Математическая формулировка источника

Математически задача ставится как начально-краевая для системы уравнений Эйлера в поле силы тяжести. Воздействие землетрясения задается через вертикальную компоненту скорости w на нижней границе ($z=0$):

$$w(x, z=0, t)=\frac{\partial \eta(x,t)}{\partial t}, \tag{1}$$

где $\eta(x,t)$ — функция вертикального смещения поверхности. Данная функция описывает как долгопериодное поднятие или опускание блоков земной коры в эпицентральной области, так и быстрые сейсмические осцилляции, характерные для первой фазы толчка.

Для обеспечения реалистичности моделирования фоновые профили температуры $T_0(z)$ и плотности $\rho_0(z)$ задавались на основе данных эмпирической модели NRLMSISE-00, скорректированных по результатам прямых спутниковых измерений прибора SABER. Такой подход позволил учесть реальное состояние статической устойчивости атмосферы в моменты рассматриваемых событий.

3 Результаты моделирования и обсуждение

3.1 Динамика формирования N-волн

Численные эксперименты показали, что через 7.0–10.0 мин после начала сейсмического воздействия в нижней термосфере (на высотах 100.0–140.0 км) фиксируется формирование ударных волн с характерным N-образным профилем. Этот эффект обусловлен нелинейным кручением фронта акустической волны при ее усилении в разреженной среде.

Для турецко-сирийского землетрясения 06.02.2023 моделирование выявило, что волновые фронты достигают высот максимума ионосферного слоя F2 (около 300.0 км) примерно через 18.0–22.0 мин. При этом горизонтальный масштаб возмущений составляет порядка 500.0 км, что свидетельствует о преобладании длинноволновых компонент в спектре отклика термосферы.

3.2 Роль зон статической неустойчивости

Особый интерес представляют результаты для японского землетрясения Тохоку (11.03.2011). Анализ фонового профиля выявил слой на высоте около 50.0 км, где параметр статической устойчивости $\alpha(z)$ принимал отрицательные значения. В этой области волновое поле претерпевало значительную трансформацию.

Модель AtmoSym позволила детально проследить процесс нелинейного обрушения волн: регулярная волновая структура разрушалась, и происходил интенсивный переход энергии в мелкомасштабные турбулентные пульсации. Этот эффект действует как своеобразный фильтр, отсекающий коротковолновые моды и ограничивающий амплитуду возмущений, проникающих в верхнюю термосферу. Тем не менее, расчеты показали формирование в термосфере концентрических волновых структур с амплитудой скорости до 200.0 м/с, что находится в хорошем количественном соответствии с данными ПЭС, полученными по сети GPS.

Заключение

Проведенное исследование подтвердило высокую эффективность численной модели AtmoSym для воспроизведения сложной динамики атмосферного отклика на сильные землетрясения. Установлено, что: а) Реальная стратификация атмосферы и наличие локальных зон статической неустойчивости существенно определяют спектральный состав и форму волнового отклика в термосфере. б) Нелинейное обрушение волн (wave breaking) является ключевым механизмом ограничения роста амплитуды АГВ на высотах выше 50 км. в) Полученные теоретические результаты для событий 2011 и 2023 гг. адекватно описывают пространственно-временные масштабы ионосферных возмущений.

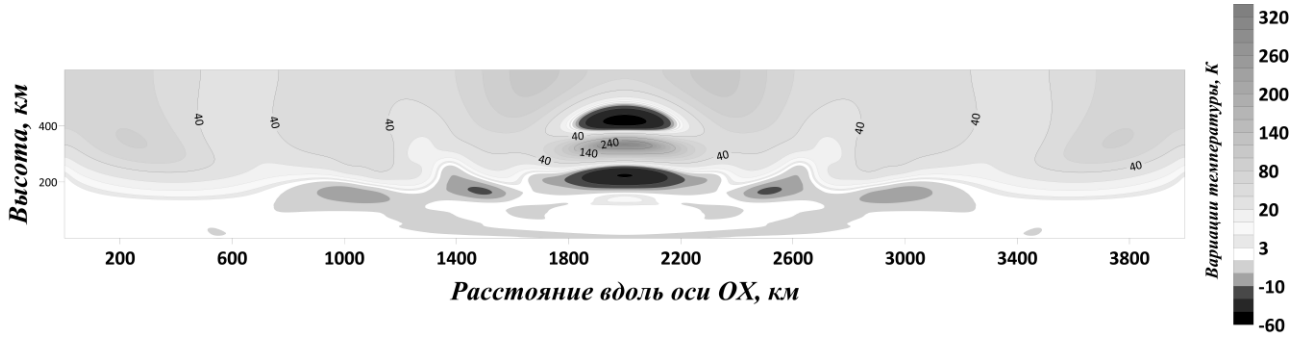


Рис. 1. Вариации температуры, вызванные источником (1), имитирующим турецко-сирийское землетрясение для t=40 после начала расчета.

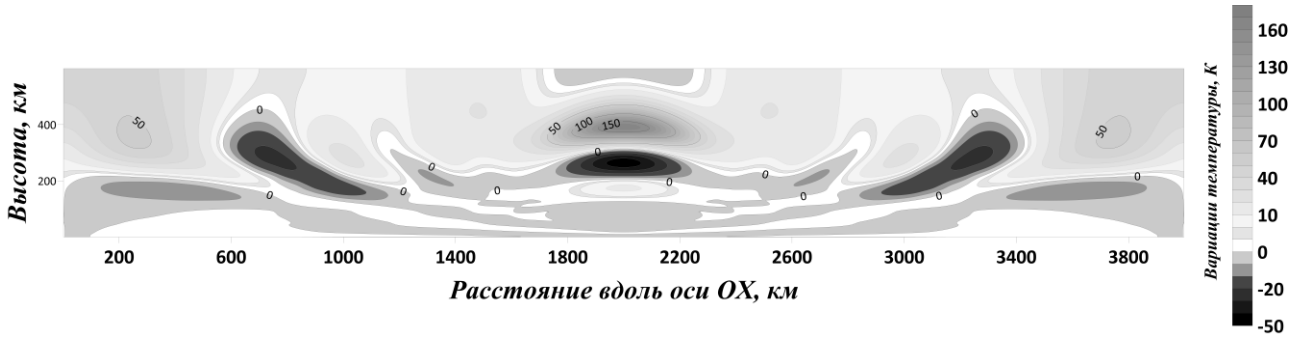


Рис. 2. Вариации температуры, вызванные источником (1), имитирующим турецко-сирийское землетрясение для t=70 мин после начала расчета.

Благодарности: Данная работа выполнена при частичной финансовой поддержке Минобрнауки, госзадания 125020501402-0 и 17.1. Расчеты распространения вол от землетрясений в разделе 3 были поддержаны Российским научным фондом (грант № 25-17-00060).

Список литературы

1. Госсард Э., Хук У. *Волны в атмосфере. Мир. М., 1978.*
2. Кшевецкий С.П. *Численное моделирование внутренних гравитационных волн в неоднородной атмосфере. // Журн. вычисл. матем. и матем. физ. 2003.* ***43****, № 10. С. 1572.*
3. Афраймович Э.Л., Перевалова Н.П. *GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. ГУП «Иркутская областная типография № 1». Иркутск, 2006.*
4. Picone J.M., Hedin A.E., Drob D.P., Aikin A.C. *NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues. // J. Geophys. Res. 2002.* ***107****, N A12. P. 1468.*
5. Kshevetskii S.P., Kurdyaeva Yu.A. *Nonlinear acoustic-gravity waves generated by a piston. // Phys. Lett. A. 2017.* ***381****, N 34. P. 2824.*
6. Perevalova N.P., Shestakov N.V., Gerasimenko M.D. *et al. Ionospheric response to the 2011 Tohoku earthquake. // Earth, Planets and Space. 2014.* ***66****, N 1. P. 1.*

7. Куличков С.Н., Авдилов А.С., Буш Г.А. *и др. О влиянии внутренних гравитационных волн на структуру инфразвуковых сигналов в зоне тени. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2010.* ***46****, № 2. С. 177.*
8. Kshevetskii S.P., Karpov I.V. *Numerical simulation of internal gravity waves in the upper atmosphere. // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2015.* ***124****. P. 1.*
9. Курдяева Ю.А., Кшевецкий С.П. *Моделирование воздействия цунами на верхнюю атмосферу. // Геомагнетизм и аэрономия. 2021.* ***61****, № 2. С. 263.*
10. Astafyeva E. *Ionospheric detection of natural hazards. // Reviews of Geophysics. 2019.* ***57****, N 4. P. 1265.*
11. Kshevetskii S.P., Kurdyaeva Y.A., Perevalova N.P., Kulichkov S.N. *Atmospheric wave*

УДК: 551.510 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39745

Применение композитного осреднения для исследования субмезомасштабной динамической структуры АПС по содарным данным

Люлюкин В.С.[1,2,a], Зайцева Д.В.[1], Каллистратова М.А.[1], Кузнецов Д.Д.[1]

[1] *Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук, 119017, Москва, Пыжевский пер., д. 3, Россия*

[2] *Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, Россия*

E-mail: [a]lyulyukin@ifaran.ru

Аннотация: Работа посвящена разработке и применению метода композитного осреднения для обработки данных акустического зондирования атмосферы. Предложенная методика позволяет выявлять форму и динамическую структуру турбулизированных слоев в атмосферном пограничном слое (АПС) на масштабах порядка нескольких минут. Метод основан на ансамблевом осреднении участков двухмерного поля измеренных данных, содержащих повторяющиеся паттерны турбулентной структуры. Это позволяет выделить особенности структуры АПС, которые сглаживаются при стандартном временном осреднении.

Ключевые слова: содары, атмосферный пограничный слой, когерентные турбулентные структуры, композитное осреднение, акустическое зондирование.

Application of composite averaging for the study of submesoscale dynamic structure of the ABL using sodar data

V.S. Lyulyukin[1,2,a] , D.V. Zaitseva[1] , M.A. Kallistratova[1] , D.D. Kuznetsov [1]

[1] *Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, 3 Pyzhevsky Lane, 119017 Moscow, Russia*

[2] *Bauman Moscow State Technical University, 5/1 2nd Baumanskaya Street, 105005 Moscow, Russia*

E-mail: [a]lyulyukin@ifaran.ru

Abstract: The work is devoted to methods of processing data from ground-based remote acoustic sensing of the atmosphere. A method of composite averaging of instantaneous sodar sounding profiles is proposed, which allows identifying the shape and dynamic structure of turbulent layers in the atmospheric boundary layer (ABL) on scales of several minutes. The method is based on ensemble averaging over sections of a two-dimensional field of measured data containing repeating patterns of turbulent structure, which makes it possible to highlight ABL structure features smoothed out during standard temporal averaging of sounding data. The method is applied to analyze vortex coherent structures in the ABL, recorded as inclined billows in the field of scattered

echo signal intensity. The vortex structure of the wind field in the background flow is identified, and the spatiotemporal and dynamic parameters of the structures are calculated.

Keywords: sodar, atmospheric boundary layer, coherent turbulent structures, composite averaging, acoustic sounding, turbulent exchange.

PACS: 92.60.Fm

Введение

Исследование динамической структуры атмосферного пограничного слоя (АПС) на субмезомасштабах (горизонтальные масштабы 100–10000 м, временные — минуты–часы) требует высокоразрешающих методов наблюдения. Акустические локаторы (содары) обеспечивают измерения профилей скорости ветра и интенсивности турбулентности с высоким пространственно-временным разрешением. Однако выделение слабых и короткоживущих субмезомасштабных возмущений из фоновой изменчивости профилей затруднено: для содарных данных типичное время осреднения, необходимое для достаточной статистической обеспеченности средних профилей, составляет порядка 10-30 минут.

Метод композитного (ансамблевого) осреднения широко применяется в физике атмосферы для выделения слабых сигналов на фоне естественной изменчивости и для получения обобщённых пространственно-временных структур атмосферных явлений. Подход используется в климатологии для оценки качества глобальных моделей [Norris & Weaver, 2001], при работе с данными дистанционного зондирования для верификации мезомасштабных моделей [Görsdorf et al., 2002]. Для сохранения индивидуальных особенностей осредняемых профилей (например, высоты слоя с максимальным сдвигом ветра) разработаны специальные методики масштабирования, когда осреднение ведётся не по фиксированной высоте, а по нормализованной координате [Brown, 1993]. В исследованиях волн Кельвина-Гельмгольца (ВКГ) в устойчиво стратифицированном пограничном слое композитный анализ позволил восстановить тонкую динамическую структуру волн по содарным данным [Lyulyukin et al., 2013]. В частности, применение этого метода в Антарктиде для анализа утренней эволюции турбулентного слоя над куполом Конкордия дало возможность получить композитную форму ВКГ на основе ансамбля из нескольких десятков последовательных валов [Petenko et al., 2023].

В данной работе описана методика применения композитного осреднения данных при регистрации структур типа валов Кельвина-Гельмгольца (ВКГ) для выявления структуры двумерного поля ветра в координатах высота — направление среднего ветра. Такой результат позволяет проводить прямые сопостовления с LES моделями и проводить расчет вертикального переноса примесей.

1 Архив содарных данных

Для применения метода композитного осреднения был сформирован специализированный архив данных, полученных в ходе регулярных экспедиционных измерений на Цимлянской научной станции Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН. Станция расположена в степной зоне Ростовской области (47°45′ с.ш., 42°10′ в.д.) на ровной открытой местности вдали от крупных населённых пунктов и промышленных объектов. Подстилающая поверхность представляет собой разнотравно-злаковую степь, что обеспечивает минимальные орографические искажения воздушного потока и низкий уровень акустических помех техногенного происхождения.

Измерения проводились с 2012 по 2025 год включительно в летний период (август). Длительность каждой экспедиции составляла от 10 до 15 дней, всего было выполнено более 10 полевых выездов. В работе использовался трёхантенный доплеровский содар высокого разрешения (модификация ЛАТАН-3м). Антенная система включала одну вертикально направленную антенну и две наклонные (угол отклонения от вертикали 30°, азимутальный разнос 90°). Технические характеристики содара: рабочая частота 2–6 кГц, в зависимости от диаметра анетенны и используемой частотной-кодировки, длительность зондирующего импульса 25–50 мс, вертикальное разрешение 5–10 м, период зондирования 2–5 с. Такие параметры обеспечивали детальную регистрацию тонкой структуры поля ветра и интенсивности турбулентности в слое от 20 до 400 м.

Благоприятные условия измерений (низкий уровень фоновых акустических шумов, отсутствие отражений от близлежащих препятствий, устойчивая стратификация в ночные часы) позволили получить эхограммы высокой контрастности с чётко выраженными квазипериодическими структурами ВКГ. Для каждого эпизода сохранялись: мгновенные профили радиальной скорости по трём лучам, интенсивность эхосигнала (пропорциональная C_T^2), интенсивность шума в прилегающей полосе частот, а также данные сопутствующих измерений. Отбор эпизодов для композитного осреднения проводился по следующим критериям: длительность эпизода не менее 10 периодов волны, отношение сигнал/шум не менее 6 дБ, отсутствие резких изменений средней скорости ветра за время эпизода.

2 Методика композитного осреднения содарных данных

Метод композитного анализа реализуется в три основных этапа, аналогично описанному в работе [Lyulyukin et al. 2013] (Рис. 1). На первом этапе на участке эхограммы, содержащем эпизод ВКГ, вручную выбирались окна данных, сдержащие отдельные валы (порядка двух десятков окон для каждого эпизода). На втором этапе производилось ручное позиционирование каждого окна осреднения образом, чтобы расположение гребней валов

совпадало для всех окон, а также отбраковка окон с валами с плохо различимой или нестандатной формой. На третьем этапе проводилось осреднение всех окон и интерполяция осредненных данных для построения композитного поля.

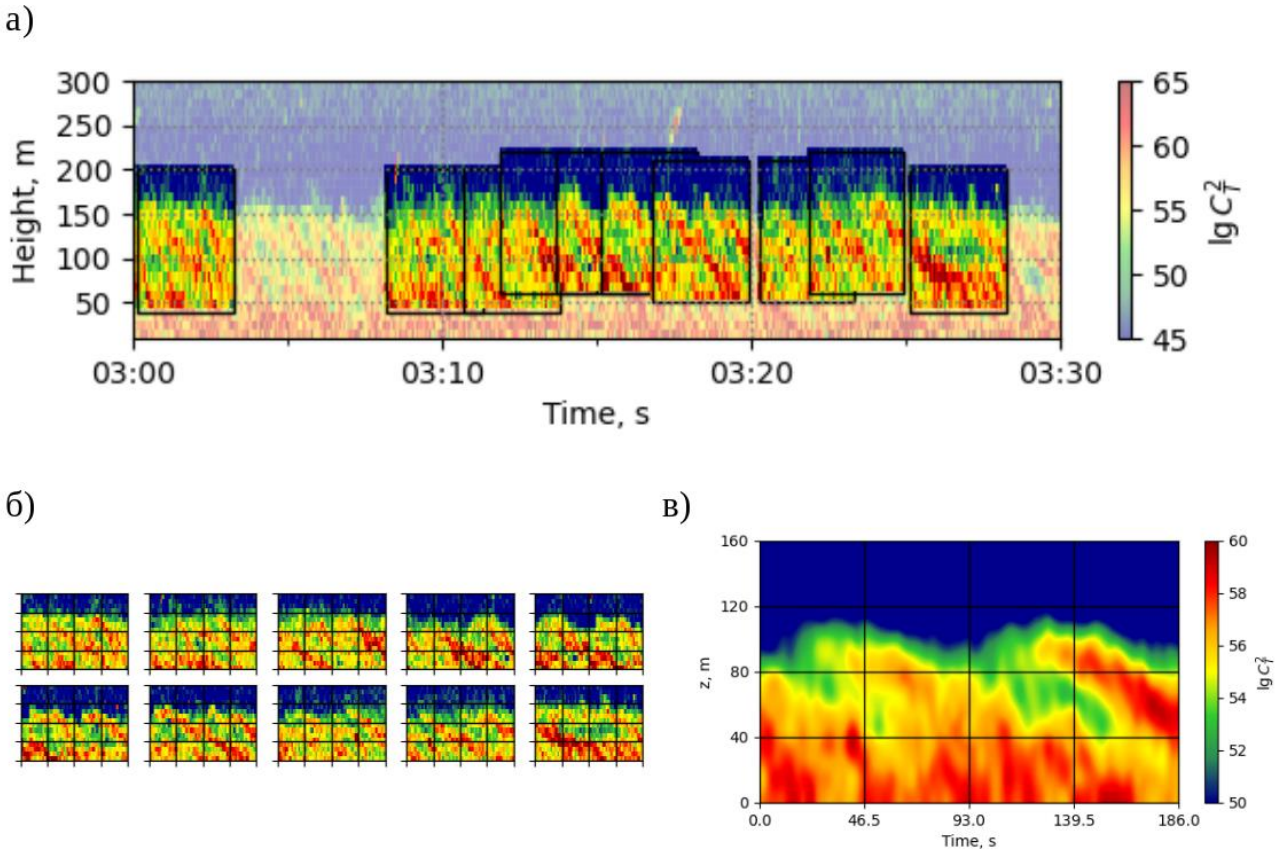


Рисунок 1. Схема композитного осреднения для эпизода 2. (а) Содарная эхограмма с эпизодом ВКГ, на которой отмечены вручную выбранные окна осреднения, содержащие отдельные валы. (б) Участки данных, отобранные для осреднения (в) Композитная структура валов.

3 Восстановление динамической структуры

После получения композитного двумерного поля интенсивности эхосигнала (пропорциональной структурной характеристике турбулентных флуктуаций температуры C_T^2) применяется процедура восстановления поля ветра. Для этого используются данные доплеровского содара, измеряющего радиальную скорость по трём направлениям (вертикаль и два наклонных луча под углом ~30°). Для каждого элемента композита (высота, фаза) осреднённые значения радиальной скорости $V_R(z,\varphi)$ позволяют рассчитать компоненты скорости ветра (u, v, w) в движущейся со средней скоростью потока системе координат.

На рис. 2 представлена композитная структура поля ветра для одного из характерных эпизодов ВКГ, зарегистрированных на Цимлянской научной станции. Цветовым фоном показана осреднённая интенсивность эхосигнала, которая визуализирует форму волнового пакета. Поверх фона нанесены векторы горизонтальной u и вертикальной w компонент скорости в системе отсчёта, движущейся с фазовой скоростью волны. Хорошо видно, что

внутри каждого вала формируется замкнутая вихревая ячейка: в передней части волны (по ходу движения, слева направо) преобладают нисходящие движения, в задней – восходящие.

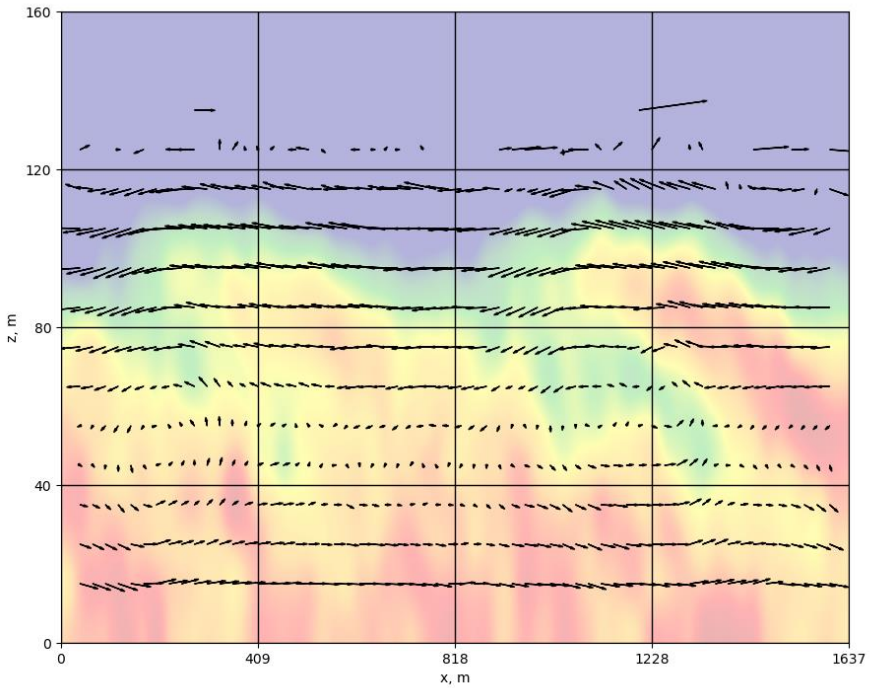


Рисунок 2. Композитная структура поля ветра внутри волны Кельвина-Гельмгольца. Цветовой фон – нормированная интенсивность эхосигнала. Векторы – горизонтальная (u) и вертикальная (w) компоненты скорости в системе отсчёта, движущейся с фазовой скоростью волны. Горизонтальная координата x в метрах расчитана в соответствии с гипотезой Тейлора для средней скорости потока, вертикальная ось относительная высота от нижнего уровня структуры, м.

Максимумы горизонтальной компоненты возмущений скорости достигают 1.2 м/с, что составляет около 15% от средней скорости течения. Вертикальные скорости внутри вихря достигают абсолютных значений 0.4 м/с. Такая картина согласуется с классической моделью «кошачьих глаз» для волн Кельвина-Гельмгольца, полученной в лабораторных экспериментах и численных расчётах.

Заключение

Разработанный метод композитного осреднения содарных данных позволяет выделить регулярную волновую составляющую поля турбулентности и ветра из сильно зашумленных экспериментальных данных, восстановить двумерную структуру поля скорости внутри волны Кельвина-Гельмгольца с высоким разрешением и количественно оценить завихренность и циркуляцию воздушных масс в волновом слое. Полученное композитное поле скорости может быть непосредственно сопоставлено с результатами численного моделирования крупных вихрей (Large Eddy Simulation, LES). Такое сопоставление открывает возможность верификации LES-моделей в части воспроизведения когерентных вихревых структур в устойчиво стратифицированном пограничном слое, что особенно важно, поскольку

стандартные осреднённые профили не содержат информации о субмезомасштабной динамике. В последние годы LES-моделирование активно используется для исследования развития и разрушения волн Кельвина-Гельмгольца, а также их влияния на вертикальный перенос [Jiang, 2024]. В работе Фриттса с соавторами детально исследованы вторичные неустойчивости, приводящие к турбулентному распаду валов Кельвина-Гельмгольца, что подтверждает необходимость высокого разрешения моделей для адекватного описания этих процессов [Fritts et al., 2021]. Кроме того, восстановленная динамическая структура ВКГ может служить в качестве входных данных для моделей переноса примесей. Учёт квазипериодических возмущений скорости внутри волнового слоя позволяет более точно рассчитывать траектории распространения загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы, особенно в ночное время при устойчивой стратификации, когда вклад волновых процессов в вертикальный обмен становится определяющим. Метод не ограничен только ВКГ и может быть применён к любым периодическим структурам, наблюдаемым в АПС, включая волны плавучести, солитоны и конвективные валики. Основным ограничением метода остаётся необходимость в большом числе однотипных эпизодов для набора статистики, однако перспективы автоматизации поиска и синхронизации фаз позволят распространить его на непрерывную обработку длительных рядов наблюдений.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 25-17-00060).

Список литературы

1. *Norris J.R., Weaver C.P.* Improved techniques for evaluating GCM cloudiness applied to the NCAR CCM3 // Journal of Climate. – 2001. – **14**. – P. 2540–2550.
2. *Görsdorf U., Beyrich F., Dier H., Leiterer U.* Composite wind and temperature profiles obtained from a complex of in-situ and remote sensing measurement systems for the forcing of a boundary layer model // Theoretical and Applied Climatology. – 2002. – **73**. – P. 97–105.
3. *Brown R.A.* A compositing approach for preserving significant features in atmospheric profiles // Monthly Weather Review. – 1993. – **121**. – P. 874–880.
4. *Lyulyukin V., Kouznetsov R., Kallistratova M.* The composite shape and structure of braid patterns in Kelvin-Helmholtz billows observed with a sodar // J. Atmos. Oceanic Technol. – 2013. – **30**. – P. 2704–2711.
5. *Petenko I., Casasanta G., Kallistratova M., Lyulyukin V., Genthon C., Sozzi R., Argentini S.* Kelvin–Helmholtz Billows in the Rising Turbulent Layer During Morning Evolution of the ABL at Dome C, Antarctica // Boundary-Layer Meteorology. – 2023. – **187**. – P. 163–192.
6. *Jiang Q.* Growth and Breakdown of Kelvin–Helmholtz Billows in the Stable Atmospheric Boundary Layer // Atmosphere. – 2024. – **15**(2). – P. 220.
7. *Fritts D.C., Wang L., Lund T.S., Thorpe S.A.* Multi-scale dynamics of Kelvin–Helmholtz instabilities. Part 1. Secondary instabilities and the dynamics of tubes and knots // Journal of Fluid Mechanics. – 2021. – **941**. – A30.

УДК: 53.088 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39746

МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА ИНФРАЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ ОТ ГРОЗОВОГО ФРОНТА

Снитковский Максим Владиславович [1, a], Чуличков А.И. [1,2, b], Закиров М.Н. [2], ЦыбульскаяН.Д. [2], КуличковС.Н. [1,2, c], Голикова Е. В.[2]

[1]Кафедра методов математического моделирования и информатики, Физический факультет, МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва 119991, Россия

[2] ИФА им. А.М.Обухова РАН, Москва119017, Пыжевский пер., д.3. стр.1.

E-mail: [a] snitkovskymaks@gmail.com, [b] achulichkov@gmail.com, [c]snik1953@gmail.com

Аннотация: Исследуется возможность раннего обнаружения грозовых событий по минутным инфразвуковым вариациям атмосферного давления, регистрируемым сетью микробарографов. Сигнал описывается линейной марковской моделью первого порядка; после робастной оценки параметров применяется фильтр Калмана, а в качестве основных признаков используются нормированная инновация, её энергия и производные статистики окна.

Ключевые слова: микробарограф, инфразвук, гроза, фильтр Калмана, инновации, логистическая регрессия, ранжирование.

MORPHOLOGICAL METHODS FOR THE ANALYSIS OF INFRASOUND SIGNALS FROM A THUNDERSTORM FRONT

M. V. Snitkovsky[1, a], A. I. Chulichkov[1,2], M. N. Zakirov [2], N. D. Tsybulskaya[2], S. N. Kulichkov[1,2], E. V.Golikova[2]

[1]Department of Mathematical Modeling and Computer Science, Faculty of Physics, M.V.Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia

[2] A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physicsof the Russian Academy of Sciences, Moscow119017, Russia, Pyzhevskylane,3,1.

E-mail: [a] snitkovskymaks@gmail.com, [b] achulichkov@gmail.com, [c]snik1953@gmail.com

Abstract: This paper investigates the possibility of early thunderstorm detection using minute-resolution infrasound variations of atmospheric pressure recorded by a network of microbarographs. The signal is described by a first-order linear Markov model; after robust parameter estimation, a Kalman filter is applied, and the main features are the normalized innovation, its energy, and derived window statistics.

Keywords: microbarograph, infrasound, thunderstorm, Kalman filter, innovation, logistic regression, ranking.

PACS:07.05.Kf, 43.28.−g

Введение

В настоящей работе анализируется возможность раннего обнаружения гроз по наземным измерениям слабых вариаций атмосферного давления. Используются данные трёх микробарографов, расположенных на территориях ИФА, МГУ и поселка Мосрентген, приведённые к общей временной сетке с шагом 1 минута. Для решения поставленной задачиформа акустического сигнала представляется как сумма фона, моделируемого как квазистационарный марковский процесс, и сигнала от грозового фронта. Для отделения сигнала от фона используется фильтра Калмана [1]. Результат фильтрации представлялся в ранговой шкале, упорядочивающий отличие отфильтрованного сигнала от фона и близость его к сигналу от грозового фронта.

В качестве интерпретируемой финальной модели выбрана логистическая регрессия, а оценка проводилась по OOF предсказаниям [2, 3] в двух режимах: на 100 повторных групповых разбиениях и в схеме LOSO [4, 5]. В обоих случаях модель превосходит случайный уровень, а верхняя часть ранжированного списка оказывается обогащена реальными грозовыми событиями.

1 Данные и метод

Для построения моделей форм фона и сигнала использовалась разметкарегистрируемых сигналов, на которых были выделены фрагменты длительностью 120 минут с началом за 240 минут до событий, источником которых являются грозовые фронты (положительные примеры), и участки фона (отрицательные примеры). В результате формировалась выборка с сильным дисбалансом: в режиме повторных групповых разбиений доля положительного класса составляла около 2.88%, а в схеме LOSO при объединении OOF-предсказаний оказывалась ещё ниже, около 0.28%.

Сигнал каждого прибора описывался линейной марковской моделью первого порядка$x_t = rx_{t-1} + w_t, w_t \sim \mathcal{N}(0, Q)$,а наблюдение задавалось как$z_t = x_t + v_t, v_t \sim \mathcal{N}(0, R)$.

Коэффициент перехода r и дисперсия процесса Q оценивались методом RANSAC на наборе отрицательных примеров, а дисперсии измерительного шума R_i восстанавливались из системы уравнений для разностей между приборами при предположении независимости ошибок. Полученные значения параметров приведены в табл. 1.

Таблица 1

Оценённые параметры марковской модели и измерительного шума

Прибор	r	Q	R
МГУ	0.931	0.193	4.525
ИФА	0.913	0.252	9.284
МосРентген	0.975	0.241	14.757

После оценки параметров применялся фильтр Калмана. Основной анализ строился на основенормированной инновации $\nu_t = \frac{z_t - \hat{x}_{t|t-1}}{\sqrt{P_{t|t-1}+R}}$, которая в нормальном фоновом режиме должна быть близка к стандартной нормальной случайной величине $\nu_t \sim \mathcal{N}(0,1)$.Для выявления последовательных отклонений использовалась энергия инновации$E_t^{(k)} = \sum_{i=t-k+1}^{t} \nu_i^2$, которая при корректной фоновой модели должна приближённо подчиняться распределению χ_k^2. В работе использовалось окно $k = 20$, для которого 95%-квантиль равен 31.41. Тем самым рост дисперсии инновации, энергии инновации и отклонения этих характеристик от ожидаемого режима может быть предвестником грозы, как видно из анализа модели, в качестве которой была выбрана логистическая регрессия. Такой выбор обусловленеё интерпретируемостью: коэффициенты позволяют понять, какие именно характеристики сигнала оказываются наиболее важными. В этом смысле логистическая регрессия в данной работе служит не просто классификатором, а инструментом физически осмысленного анализа признаков.

2 Экспериментальный протокол

Основной анализ проводился в двух схемах: на 100 повторных групповых разбиениях и в режиме LOSO, в котором для каждого шторма модель обучалась на всех остальных штормах и тестировалась на одном ранее невидимом событии. В обеих схемах использовались только OOF предсказания, то есть ответы модели на объектах, не участвовавших в обучении. Далее все такие предсказания объединялись, и по ним строились глобальные ROC- и PR-кривые, а также вычислялись итоговые метрики.

Хотя формально задача является бинарной классификацией окна, в прикладном смысле она лучше описывается как задача ранжирования. Вероятностный выход модели позволяет не только ввести порог и получить решение «гроза / не гроза», но и упорядочить окна по степени опасности. Поэтому центральными метриками являются PR-AUC, Lift@K и Recall@K. При этом базовый уровень для PR-кривой определяется как доля положительного класса в соответствующем объединённом OOF-наборе. Для случайной модели PR-AUC совпадает с базовым уровнем, а Lift@K = 1; следовательно, значения PR-AUC >базового уровня и Lift@K> 1 указывают на полезность модели. Поскольку базовый уровень в режимах групповых

разбиенийи LOSO различается, прямое сравнение абсолютных значений PR-AUC между ними ограничено; для сопоставления схем более содержателен именно Lift@K.

3 Результаты и практические следствия

Одним из наиболее содержательных результатов оказался анализ коэффициентов логистической регрессии. Наибольшими по модулю коэффициентами обладают признаки, связанные с энергией инновации, дисперсией инновации, отклонением дисперсии от единицы, отклонением энергии от единицы, средним инновации и долей значений выше порога в 3σ. Иными словами, именно эти признаки вносят наибольший вклад в итоговое решение модели. Это означает, что модель реагирует прежде всего на нарушение фоновой марковской динамики, а не на случайные эмпирические статистики.

Основные результаты двух схем оценки сведены в табл. 2. В ней объединенный OOF PR-AUC и базовый уровень вычислены по объединённым OOF предсказаниям, а Lift@100 и Recall@100приведены как средние по соответствующим сплитам или штормам. Дополнительный столбец PR-AUC / базовый уровень показывает, во сколько раз качество по PR-AUC превосходит случайный уровень для данного дисбаланса.

Таблица 2

Сравнение повторных групповых разбиений и LOSO по OOF-метрикам

Схема	**Базовый уровень**	**PR-AUC (OOF)**	**PR-AUC / базовый уровень**	**Lift@100**	**Recall@100**
100 повторных групповых разбиений	0.029	0.075	2.55	3.59	0.283
LOSO	0.003	0.008	2.86	3.66	0.371

Эта таблица показывает, что в обеих схемах модель превосходит случайный уровень: PR-AUC выше базового уровня, а Lift@100 существенно больше единицы. Иными словами, верхняя часть ранжированного списка содержит реальные грозовые события примерно в 3.5-3.7 раза чаще, чем случайная выборка того же объёма. При этом абсолютные значения PR-AUC между схемами различаются главным образом потому, что в LOSO положительный класс встречается значительно реже.

Глобальные ROC- и PR-кривые по объединённым OOF-предсказаниям для групповых разбиений приведены на рис. 1. Они подтверждают, что модель извлекает статистически содержательный сигнал и что ранжирование заметно лучше случайного даже при сильном дисбалансе.

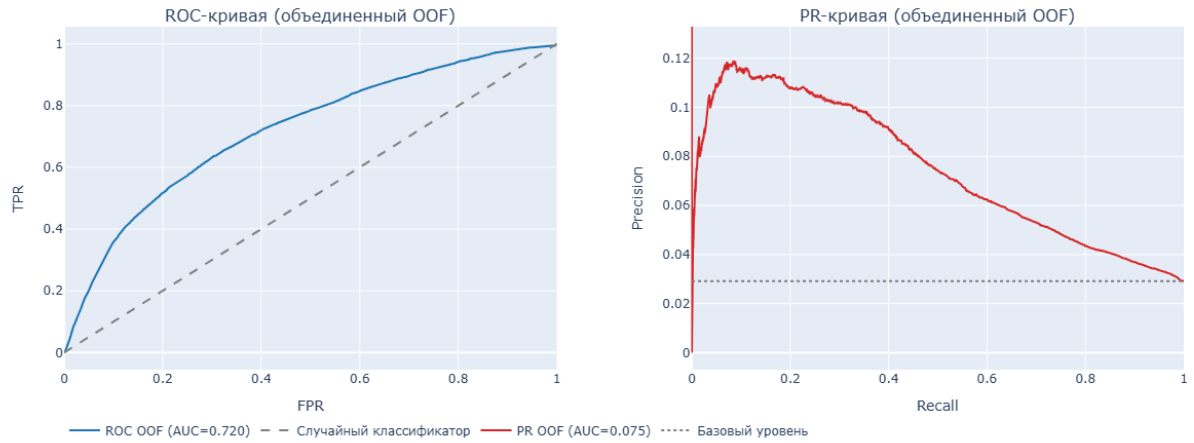


Рисунок 1. Глобальные ROC- и PR-кривые по объединенным OOF-предсказаниям по 100 повторным групповым предсказаниям.

Более строгую проверку даёт LOSO, в котором каждый тестовый набор соответствует новому, ранее невидимому шторму. Поскольку при текущей OOF-оценке ключевые ранговые метрики в LOSO оказываются сопоставимы с результатами групповых сплитов, эта схема указывает на то, что модель сохраняет полезную ранжирующую способность и на новых событиях. Итоговые ROC- и PR-кривые по объединённым OOF-предсказаниям приведены на рис. 2.

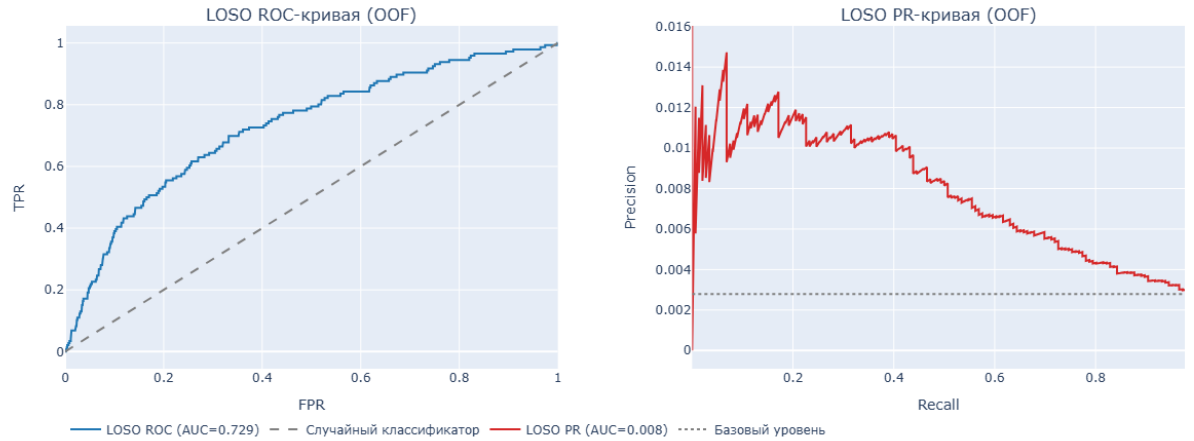


Рисунок 2. ROC- и PR-кривые по объединенным OOF-предсказаниям в режиме LOSO.

Перестановочный тест [6] для объединенного LOSO ROC-AUC даёт p = 0.001, что подтверждает статистическую значимость наблюдаемого сигнала и показывает, что полученное качество не сводится к случайной флуктуации.

4 Заключение

В работе предложен интерпретируемый подход к раннему обнаружению грозовых событий по инфразвуковым сигналам микробарографов, основанный на физически мотивированном описании фоновой динамики линейной марковской моделью, робастной оценке её параметров, применении фильтра Калмана и анализе нормированной инновации как

меры отклонения от нормального режима. Показано, что наиболее информативными оказываются признаки, связанные с дисперсией и энергией инновации, а также с их отклонением от ожидаемой статистики фона; это подтверждает исходную гипотезу о том, что в предвестниковой зоне и вблизи грозового фронта сигнал перестаёт подчиняться обычной фоновой динамике.

Оба режима оценки строятся по OOF предсказаниям и показывают, что модель устойчиво превосходит случайный уровень: PR-AUC выше соответствующего базового уровня, а Lift@100 существенно больше единицы. При этом базовый уровень в повторных групповых предсказаниях и LOSO различается из-за разного дисбаланса классов, поэтому сравнивать схемы следует прежде всего по нормированным ранговым метрикам. В этом смысле наиболее содержательным результатом является то, что в обоих режимах верхняя часть ранжированного списка оказывается обогащена реальными событиями примерно в 3.5-3.7 раза по сравнению со случайной моделью. Тот факт, что результаты LOSO оказываются сопоставимы с групповыми сплитами, указывает на сохранение полезной ранжирующей способности и на ранее невидимых штормах, хотя окончательные выводы о переносимости требуют дальнейшей проверки на более широком наборе событий. Поэтому текущую систему разумнее рассматривать не как законченный пороговый классификатор, а как основу для ранжирующего детектора грозовой опасности.

С практической точки зрения вероятностный выход модели может использоваться как непрерывный индекс риска, по которому выделяются зоны повышенной опасности, а при развёртывании естественно учитывать три локальных детектора по числу микробарографов, их нестрогую временную синхронность, возможное морфологическое выравнивание откликов и согласованность срабатываний.

Список литературы

1. *Kalman R.E.* A new approach to linear filtering and prediction problems. // J. Basic Eng. 1960. **82**, N 1. P. 35.
2. *Wolpert D.H.* Stacked generalization. // Neural Networks. 1992. **5**, N 2. P. 241.
3. *Breiman L.* Stacked regressions. // Machine Learning. 1996. **24**, N 1. P. 49.
4. *Kohavi R.* A study of cross-validation and bootstrap for accuracy estimation and model selection. // IJCAI. 1995. **14**. P. 1137.
5. *Arlot S., Celisse A.* A survey of cross-validation procedures for model selection. // Statistics Surveys. 2010. **4**. P. 40.
6. *Ojala M., Garriga G.C.* Permutation tests for studying classifier performance. // J. Mach. Learn. Res. 2010. **11**. P. 1833.

УДК: 534.222.1 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39747

Графовый алгоритм построения траектории акустического луча на примере вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай

М.Н. Закиров[1,a], С.Н. Куличков[1,2], А.И. Чуличков[2]

[1] *Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН.*

119017, Москва, Пыжевский пер. 3, Россия.

[2] *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Физический факультет.*

119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, ГСП-1, Россия.

E-mail: [a]zakirov.mn16@physics.msu.ru

Аннотация: В работе предложен эффективный метод расчета волнового фронта, основанный на трассировке лучей с использованием дискретизации пространства в виде специального графа. Узлы графа содержат координаты точек пространства, а веса ребер определяются минимальным временем прохождения акустического сигнала между вершинами с учетом метеорологических параметров среды. Прямой обход графа позволяет получить оценку времени распространения до конечной точки, а обратный проход по кратчайшему пути от приемника к источнику обеспечивает реконструкцию координат точек, формирующих оптимальную траекторию луча. Алгоритм обеспечивает оценку геометрии луча и позволяет моделировать распространение атмосферных акустических волн на расстояния порядка нескольких тысяч километров.

Ключевые слова: волновой фронт, трассировка лучей, распространение сигнала, графовый алгоритм, моделирование атмосферы.

Graph algorithm for constructing the acoustic beam trajectory using the example of the Hunga-Tonga-Hunga-Ha'apai volcano

M.N. Zakirov[1,a], S.N. Kulichkov[1,2], A.I. Chulichkov[2]

[1] *A. M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences,*

Moscow 119017, Russia.

[2] *Department of Physics, M.V. Lomonosov Moscow State University.*

Moscow 119991, Russia.

E-mail: [a]zakirov.mn16@physics.msu.ru

Abstract: The paper proposes an effective method for calculating the wavefront based on ray tracing using space discretization in the form of a special graph. The nodes of the graph contain the

coordinates of the points in space, and the weights of the edges are determined by the minimum travel time of the acoustic signal between the vertices, taking into account the meteorological parameters of the environment. A direct traversal of the graph allows us to obtain an estimate of the propagation time to the end point, and a reverse passage along the shortest path from the receiver to the source provides reconstruction of the coordinates of the points forming the optimal trajectory of the beam. The algorithm provides an estimate of the beam geometry and makes it possible to simulate the propagation of atmospheric acoustic waves over distances of the order of several thousand kilometers.

Keywords: wavefront, ray tracing, signal propagation, graph algorithm, atmospheric modeling.

PACS: 43.20.Dk

Введение

Точное решение задачи распространения звука требует знания о состоянии атмосферы и рельефе подстилающей поверхности вдоль трассы распространения. Задача усложняется несколькими факторами: свойства атмосферы нестационарны и формируются под действием многочисленных факторов: турбулентности, конвекции, солнечной активности, взаимодействием с подстилающей поверхностью и океаном, на больших расстояниях объем вычислений растет, а движение и протяженность источника затрудняют оценку его положения. Существует несколько подходов к решению данной задачи в зависимости от масштаба, имеющихся ресурсов и требуемой точности. Наиболее известные подходы в литературе – это метод конечных элементов (МКЭ), метод конечных элементов во временной области (FDTD), методы параболического уравнения и трассировки лучей.

Для решения локальных задач акустики часто применяется МКЭ, в котором исследуемая область разбивается на совокупность конечных элементов, образующих расчетную сетку. В пределах каждого элемента искомое решение аппроксимируется суперпозицией заданных базисных функций, что позволяет свести исходное дифференциальное уравнение в частных производных к эквивалентной системе линейных алгебраических уравнений. Данный метод корректно описывает сложные волновые эффекты, включая дифракцию и интерференцию, и применим к задачам с произвольной геометрией расчетной области. Однако его использование сопряжено со значительными вычислительными затратами, которые неуклонно возрастают с увеличением частоты сигнала – это обусловлено необходимостью размещения на каждой длине волны не менее нескольких элементов сетки. Подобные ограничения делают метод конечных элементов целесообразным

лишь для задач сравнительно небольших пространственных масштабов, сравнимыми по порядку величины с несколькими длинами волн.

Методы конечных разностей во временной области (FDTD) реализуют численную схему решения системы уравнений акустики путем дискретизации пространственных и временных координат на равномерную сетку с фиксированным шагом, при этом дифференциальные операторы аппроксимируются конечно-разностными отношениями. Данный подход эффективен при моделировании задач со сложной геометрией границ, анизотропными и диссипативными свойствами среды, а также при исследовании нестационарных акустических процессов. Несмотря на применение современных многопоточных вычислительных архитектур для оптимизации производительности, решение трехмерных задач распространения звука остается чрезвычайно ресурсоемким.

Метод параболического уравнения в акустике основан на упрощении волнового уравнения для случая преимущественно однонаправленного распространения волн. Решение представляется в виде произведения быстро осциллирующей (несущей) функции и медленно меняющейся огибающей. Подстановка такого представления в волновое уравнение с последующим пренебрежением второй производной огибающей приводит к параболическому уравнению относительно огибающей акустического поля. Метод широко используется для расчета дальнего распространения звука в атмосфере и океане, где характерные углы отклонения лучей от горизонтали невелики, однако имеет ограничения при существенном отклонении направления распространения от заданной оси, а также в случае сильной обратной дифракции или при наличии выраженных резонансных эффектов, требующих учета многократных отражений против направления распространения.

В методе трассировки лучей звуковая волна аппроксимируется конечным набором лучей, исходящих от источника и подчиняющихся законам геометрической оптики. В однородной среде луч распространяется прямолинейно, однако флуктуации температуры воздуха, а также изменения скорости и направления ветра вызывают преломление или отражение лучей, вследствие чего распространение волн в атмосфере приобретает анизотропный характер. Основными достоинствами метода трассировки лучей являются высокая скорость расчета и простота визуализации результатов; вместе с тем данный метод не учитывает дифракцию и интерференцию волн.

1 Описание алгоритма

Для решения задачи предположим, что луч распространяется по принципу наименьшего действия: траектория луча выбирается такой, чтобы минимизировать время распространения сигнала. Алгоритм основан на построении специального графа, и его идея состоит в следующем: из точки источника начинается построение графа в сторону приемника с

некоторым шагом (1), вершины которого соответствуют точкам на поверхности Земли и содержат информацию о минимальном времени прохождения сигнала от источника до этой точки, а ребра задают допустимые переходы между точками (рис. 1). В соответствии с принципом Гюйгенса-Френеля, каждая построенная точка является источником для следующих точек. Однако в таком случае количество точек будет расти в геометрической прогрессии, и чтобы этого избежать, требуется на каждом шаге проводить фильтрацию: будем кластеризовать точки методом k-медоид, и оставлять из каждого кластера по одной точке, ближайшей к приемнику. Число кластеров k можно оценить по количеству точек на предыдущем шаге.

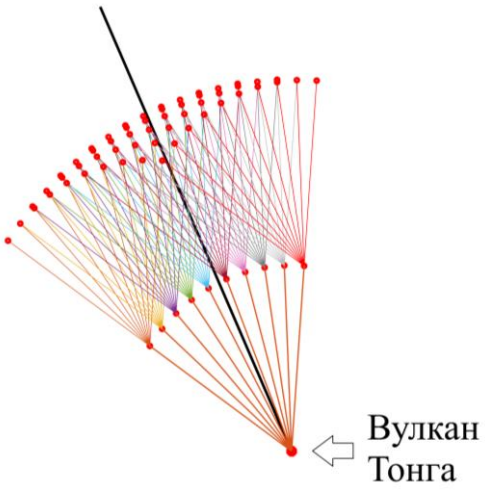


Рис. 1 – Структура графа после двух шагов: красные точки – вершины графа, цветные отрезки – ребра, соединяющие вершины, черная линия – дуга большого круга, проведенная от источника к приемнику. Видно, что образуются неоптимальные вершины, которые нужно фильтровать.

После того как граф построен, выполняется обход графа в обратном направлении от конечной точки. Полученная последовательность вершин и дает оценку искомой траектории луча. Условием остановки можно принять близость какой-либо вершины к точке приемника.

Метод учитывает состояние атмосферы и высоту подстилающей поверхности следующим образом. Каждая следующая точка будет расположена от предыдущей на расстоянии:

$$dr(\boldsymbol{r}) = c_{avg.}(\boldsymbol{r})dt\,, \tag{1}$$

где c – средняя скорость звука с учетом скорости ветра в точке с радиус-вектором $\boldsymbol{r}$, dt – шаг по времени, задаваемый пользователем; малые значения шага приводят к ресурсоемким расчетам, однако обеспечивают более высокое пространственное разрешение. Средняя скорость вычисляется по формулам (2-5):

$$c_{avg.}(\boldsymbol{r}) = \left\langle c(\boldsymbol{r}, z) + V(\boldsymbol{r}, z) \right\rangle, \tag{2}$$

$$c(\boldsymbol{r}, z) = 20.06\sqrt{T(\boldsymbol{r}, z)}\,, \tag{3}$$

$$\left\langle f(\boldsymbol{r})\right\rangle = \frac{\int_0^{+\infty} \varepsilon(\boldsymbol{r},z)\, f(\boldsymbol{r},z)dz}{\int_0^{+\infty} \varepsilon(\boldsymbol{r},z)dz}, \tag{4}$$

$$\varepsilon(\boldsymbol{r},z) = \frac{p_0^{\frac{2}{\gamma}}(\boldsymbol{r},z)}{\rho_0(\boldsymbol{r},z)}, \tag{5}$$

V - проекция скорости ветра на направление распространения, T - абсолютная температура воздуха, ε – весовая функция при усреднении по высоте, p_0 и ρ_0 - давление и плотность невозмущенной среды, γ=1.4 – показатель адиабаты воздуха. В формуле (4) интегрирование ведется от высоты земной поверхности до максимально доступной в модели высоты (80 км). Использованная весовая функция соответствует [1], вообще говоря, вместо формул (2, 5) можно использовать и другие формулы усреднения.

2 Результат построения траектории

Извержение вулкана Хунга-Тонга является одним из самых сильных вулканических событий за последнее тысячелетие [2-4]. Колебания атмосферного давления были зафиксированы станциями по всему миру. На рис. 2 показаны: дуга большого круга и построенная траектория, цвет поверхности Земли обозначает ее высоту. Можно заметить, что линии расходятся особенно на Дальнем Востоке.

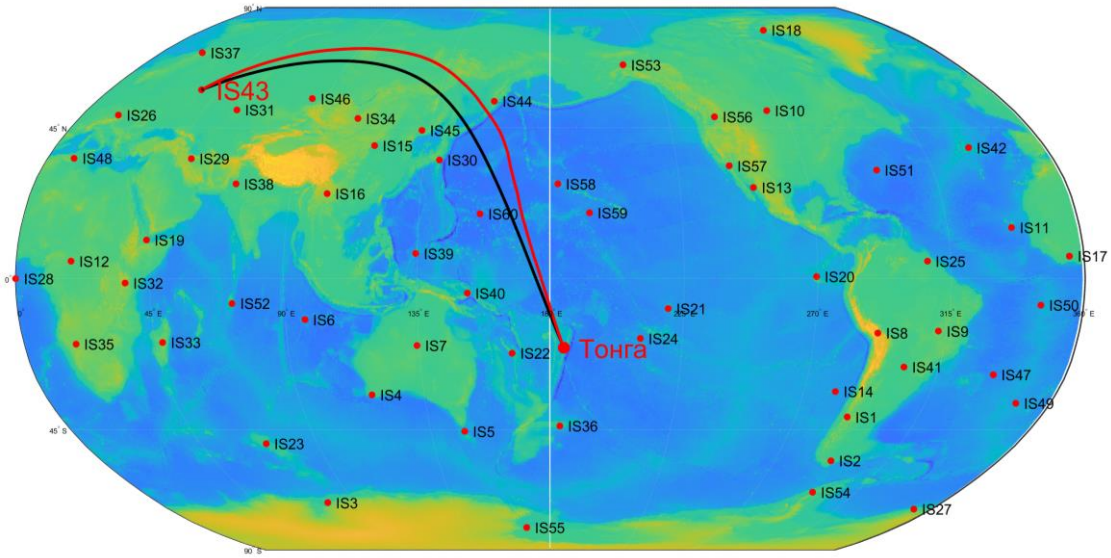


Рис. 2 – Расположение вулкана, приемника, дуга большого круга (черная) и построенная траектория луча (красная).

Зная траекторию, можно оценить скорость звука в каждой точке, определить путь и время прохождения сигнала. На рис. 3 приведен график скорости звука вдоль траектории по формулам (2-3) без учета ветра. Как видно из рисунка 3, на начальном участке трассы (до расстояния около 4–5 тыс. км) скорость наибольшая, что можно объяснить прохождением луча через экваториальные широты с относительно теплым воздухом. Далее, по мере распространения волны в северные широты, скорость снижается.

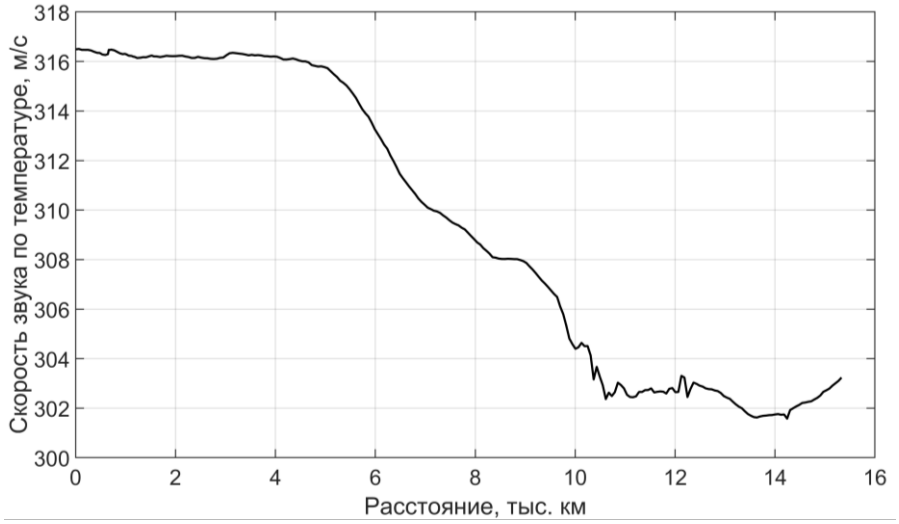


Рис. 3 – Зависимость усредненной по высоте скорости звука вдоль трассы

По результатам расчета, время распространения от вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай до станции IS43 равно $(4.96\pm0.01)\cdot10^4$ секунд, что согласуется с литературой [5].

Заключение

Представленный метод обеспечивает построение траекторий акустических лучей на значительные расстояния, учитывая параметры атмосферы и рельеф подстилающей поверхности при расчёте траектории минимизацией времени распространения сигнала. Сопоставление результатов моделирования с экспериментальными данными демонстрирует их хорошее согласование. Построены графики зависимости скорости звука вдоль трассы распространения.

Список литературы

1. *Pierce, A., Posey, J.* Theory of the excitation and propagation of Lamb's atmospheric edge mode from nuclear explosions. // Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society. 1971. **26**. P. 341–368.
2. *Chulichkov, A.I., Tsybulskaya, N.D., Zakirov, M.N. et al.* Detecting Infrasonic Signals from Impulsive Sources on the Basis of Their Wavelet Spectrum Forms. // Pure and Applied Geophysics. 2022. **179**. P. 4609–4625.
3. *Li, C.* Global shockwaves of the Hunga Tonga–Hunga Ha'apai volcano eruption measured at ground stations. // iScience. 2022. **25**, N 11.
4. *Tarumi K., Yoshizawa K.* Eruption sequence of the 2022 Hunga Tonga-Hunga Ha'apai explosion from back-projection of teleseismic P waves // Earth and Planetary Science Letters. 2023. **602**. P. 117966.
5. *Попов О.Е., Чунчузов И.П., Куличков С.Н., Закиров М.Н., Мишенин А.А., Лесик Н.П.* Детальные измерения характеристик волны Лэмба и механизм ее генерации при извержении вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай // Сборник Трудов XXXVI сессии Российского акустического общества. М., ГЕОС. 2024. с. 311-319.

УДК: 551.510 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39748

Использование акустических локаторов (содаров) для исследования субмезомасштабных структур в устойчивом атмосферном пограничном слое

Зайцева Д.В.[1,a], Каллистратова М.А.[1], Люлюкин В.С.[1,2], Кузнецов Р.Д.[3], Кузнецов Д.Д.[1]

[1] *Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук, 119017, Москва, Пыжевский пер., д. 3, Россия*

[2] *Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, Россия*

3 Финский метеорологический институт, Динамикум, Площадь Эрик Пальмен, FI-00101, Хельсинки, Финляндия

E-mail: [a]zaycevadv@gmail.com

Аннотация: Принцип работы содаров основан на объёмном рассеянии акустического импульса на турбулентных неоднородностях воздуха. Содары измеряют интенсивность рассеянного эхо-сигнала (пропорционального структурной характеристике температуры) и компонент скорости ветра. Представляемая работа посвящена использованию содарных измерений для исследования субмезомасштабных структур в атмосферном пограничном слое (АПС). Использованы данные непрерывных круглогодичных измерений, проводимых в Подмосковье слабо-неоднородной лесистой местности. Приведено описание характерных типов волновых и вихревых структур, регистрируемых в поле эхо-сигнала, получены статистические данные об их параметрах. При помощи мачтовых измерений ультразвуковыми термометрами-анемометрами получены оценки параметров турбулентности и их спектральных разложений, характерных для наблюдаемых периодических структур.

Ключевые слова: акустический локатор (содар), устойчивый атмосферный пограничный слой; субмезомасштабные структуры; турбулентность

Investigation of submesoscale structures in the stable atmospheric boundary layer with the help of acoustic sounder (sodar)

D.V. Zaitseva[1,a] , M.A. Kallistratova[1] , V.S. Lyulyukin[1,2,a] , R.D. Kouznetsov[3], D.D. Kuznetsov[1]

[1] *Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, 3 Pyzhevsky Lane, 119017 Moscow, Russia*

[2] *Bauman Moscow State Technical University, 5/1 2nd Baumanskaya Street, 105005 Moscow, Russia*

[3] Finnish Meteorolgical Institute, Erik Palménin aukio 1, FI-00101 Helsinki, Finland

E-mail: [a]zaycevadv@gmail.com

Abstract: The operating principle of sodars is based on the volumetric scattering of acoustic impulses by turbulent inhomogeneities in the air. Sodar measures the intensity of the scattered echo

пропорционального структурной характеристике температуры, и профили 3-х компонент скорости ветра. Измерения производились в диапазоне высот от 20 до 780 м с шагом 20 м по высоте и 20 с по времени. В работе представлены результаты анализа измерений 2008-2015 гг.

Идентификация интересующих эпизодов производилась путём визуального анализа высотно-временных развёрток содарного эхо-сигнала (эхограмм). Из большого многообразия наблюдаемых структур отбирались периодические структуры с двумя типами вертикальной формы. К первому типу относятся эпизоды, атрибутируемые как волны Кельвина-Гельмгольца (другие названия в литературе: внутренние гравитационно-сдвиговые волны, валы Кельвина-Гельмгольца, вихревые волны; далее будет использоваться сокращение ВКГ), которые на высотно-временных развёртках имеют форму периодических наклонных полос, валов или кос (Рисунок 1а). Ко второму типу относятся случаи синусообразных колебаний высоты расположения турбулизированных слоев (слоев с повышенной интенсивностью эхо-сигнала), которые атрибутируются как волны плавучести (Рисунок 1б). Такие случаи могут проявляться как изменения высоты верхней границы приземного турбулизированного слоя, а также как синхронные вертикальные колебания высоты расположения нескольких приподнятых турбулизированных слоёв.

2 Параметры наблюдаемых структур

Всего за 8 лет было зарегистрировано около 1000 эпизодов: ~900 ВКГ и ~ 100 ВП. Различия частоты регистрации между разными месяцами оказались велики, что подтверждает превалирующее влияние синоптических условий на вероятность наблюдения ВКГ [Люлюкин и др., 2018]. В среднем за все годы, ВКГ наблюдались в 30 % дней вне зависимости от сезона. ВП регистрировались в среднем в 4-8 % дней с мая по август, и практически не регистрировались в другие месяцы.

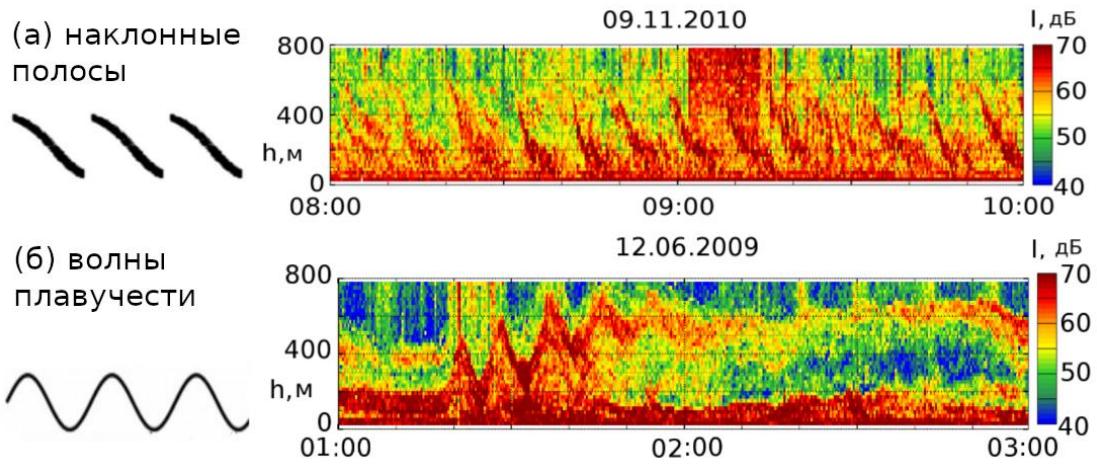


Рисунок 1. Схематичное изображение (слева) и примеры эхограмм (справа) для двух типов волнообразных структур.

Заключение

В работе представлены результаты использования акустического локатора (содара) для исследования субмезомасштабных периодических структур. Проведён анализ многолетних непрерывных измерений, проводимых в лесистой местности на Звенигородской научной станции института физики атмосферы РАН, в ходе которого выявлено более 1000 эпизодов субмезомасштабных периодических структур двух типов: волны плавучести (ВП) и валы Кельвина-Гельмгольца (ВКГ). Определено, что ВКГ наблюдаются в среднем в 30 % дней круглогодично, а ВП в 4-8 % дней с мая по август. Получены статистические данные о параметрах выявленных эпизодов. Сделаны оценки степени влияния субмезомасштабных периодических структур на характеристики турбулентности: 10 из 28 ВКГ и 9 из 10 ВП оказали значительно влияние на турбулентную кинетическую энергию и вертикальные потоки тепла и импульса. В среднем, указанные величины повышались в 2.2-3.6 раз в присутствии ВКГ и в 4.5-5.7 раз в присутствии ВП.

Работа выполнена по госзаданию Минобрнауки 125020501402-0.

Список литературы

1. *Госсард Э., Хук У.* Волны в атмосфере. Мир. М. 1978.
2. *Зайцева Д.В., Каллистратова М. А., Люлюкин В. С. и др.* Субмезомасштабные волнообразные структуры в атмосферном пограничном слое и их параметры по данным содарных измерений в Подмосковье // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2023. **59**, № 3. С. 275–285.
3. *Зайцева Д.В., Каллистратова М. А., Люлюкин В. С. и др.* Влияние внутренних гравитационных волн в атмосферном пограничном слое на измерения характеристик турбулентности пульсационным методом // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2024. **60**, № 24. С. 22–32.
4. *Камардин А.П., Одинцов С.Л., Скороходов А.В.* Идентификация внутренних гравитационных волн в атмосферном пограничном слое по данным содара // Оптика атмосферы и океана. 2014. 27, № 9. С. 812–818.
5. *Кузнецов Р.Д.* Акустический локатор ЛАТАН-3 для исследований атмосферного пограничного слоя // Оптика атмосферы и океана. 2007. **20**, № 8. С. 749–753.
6. *Люлюкин В.С., Каллистратова М.А., Кузнецов Р.Д. и др.* Внутренние гравитационно-сдвиговые волны в атмосферном пограничном слое по данным акустической локации // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. **51**, № 2. С. 218–229.
7. *Люлюкин В.С., Каллистратова М.А., Крамар В.Ф. и др.* О барических системах, благоприятствующих возникновению гравитационно-сдвиговых волн в АПС // Турбулентность, динамика атмосферы и климата: сборник трудов. М., 2018. С. 559–563.

УДК: 534.87, 519.254 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39749

Построение цветных акустических изображений с использованием метода максимально правдоподобной классификации сигналов

А.А. Родионов[1,a]

[1] *Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук. 603951, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46*
E-mail: [a]alexr@ipfran.ru

Аннотация: С помощью акустических камер за счет обработки сигналов можно строить акустические изображения, представляющие собой распределение интенсивности звука от источников из некоторой области пространства. Обычно акустическое изображение является монохромным, потому что представляет собой поверхность скалярной функции. Вместо этого можно пытаться строить цветное изображение, используя всю информацию о выделенном сигнале. Таким образом, например, высокочастотные и низкочастотные источники можно представить разными цветами. В данной работе рассматривается возможность построения таких цветных изображений

Ключевые слова: **акустическая камера, акустическое изображение, формирование диаграммы направленности, метод максимальной правдоподобной классификации сигналов**

Construction of color acoustic images using the maximum likelihood signal classification technique

A.A. Rodionov[1,a]

Federal Research Center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences (IAP RAS), 46 Ul'yanov Street, Nizhny Novgorod, 603950, Russia
E-mail: [a]alexr@ipfran.ru

Abstract: Using acoustic cameras and signal processing, it is possible to construct acoustic images that represent the sound intensity distribution from sources within a given spatial region. Typically, an acoustic image is monochrome because it represents the surface of a scalar function. Alternatively, one can attempt to construct a color image using all the information from the extracted signal. Thus, for example, high-frequency and low-frequency sources can be represented by different colors. The feasibility of constructing such color images is investigated in this paper.

Keywords: acoustic camera, acoustic imaging, beamforming, the maximum likelihood signal classification (MLSIC) technique

PACS: 02.30.Zz 43.28.-g 43.60-c

Введение

Акустические «камеры» (acoustic camera) появились несколько десятилетий назад [1] и в настоящее время имеют разнообразные практические применения [2–4]. В частности, одним из основных применений является построение акустического портрета некоторой машины или механизма для выявления источников повышенного звука и неисправностей. Сама «камера» представляет собой антенную решетку микрофонов (обычно планарную), сигналы с которой обрабатываются синхронно. Это позволяет получить оценку распределения акустической энергии в некоторой области пространства. Таким образом, получается акустическое изображение, которое можно наложить на видеоизображение исследуемого объекта. Стоит отметить, что во всех известных акустических камерах в качестве изображения используется лишь энергия акустического сигнала, приходящего из разных точек пространства. В то же время каждый источник звука обладает своим уникальным спектральным составом. То есть каждой точке изображения можно сопоставить не только интенсивность, но и «цвет», связанный со спектром звука. Эта идея без конкретики описана в работе [5]. Целью предполагаемой работы является выработка принципов и алгоритмов построения таких продвинутых акустических изображений, обладающих дополнительной глубиной. Это позволит визуально эффективно различать типы источников звука. Кроме того, получаемые параметры цвета могут быть переданы в алгоритмы машинного обучения для классификации источников звука. Также описанный принцип может быть использован для визуализации иных полей (например, в гидродинамике). Дополнительной особенностью данной работы является исследование возможности использования для формирования диаграммы направленности разработанного ранее в ИПФ РАН алгоритма [6–8]. Этот алгоритм обладает сверхразрешающими свойствами, то есть позволяет выделять сигналы от близкорасположенных источников (на угловом расстоянии меньшем, чем классическое разрешение), а также выделять сигналы слабых источников на фоне сильных.

1 Методы формирования диаграммы направленности для выделения сигналов источников с помощью микрофонных антенных решеток

Существует большое число различных методов формирования диаграммы направленности антенных решеток. Наиболее известным методом, являющимся оптимальным для случая единственного источника и независимой на элементах антенны помехи является метод суммирования с задержками (delay and sum). В спектральной области этот метод сводится к фазировке антенны (введении компенсации фаз падающей волны с направления источника звука). Другой огромный класс методов включает ту же фазировку, дополненную подавлением сосредоточенных помех (выбеливанием). В спектральной области все упомянутые методы можно записать в следующем виде:

$$s_j(f) = \frac{\mathbf{a}^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{x}_j}{\mathbf{a}^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}}, \qquad j = 1 \ldots J, \tag{1}$$

где $s_j(f)$ – отсчет с номером j выделенного узкополосного сигнала, $\mathbf{x}_j$ – вектор отсчетов принятого антенной решеткой сигнала в узкой полосе на частоте f с номером j, $\mathbf{a}$ – вектор направлений на источник принятого сигнала (соответствует, например, плоской волне), $\mathbf{R}$ – суммарная корреляционная матрица помехи и шума. Для метода суммирования с задержками $\mathbf{R} = \mathbf{I}$, для всех остальных методов матрица $\mathbf{R}$ может содержать информацию о количестве, мощностях и направлениях сосредоточенных помех, а также информацию о характеристиках распределенной помехи и фонового шума. Весьма эффективным методом адаптивного формирования диаграммы направленности является метод максимально правдоподобной классификации сигналов (МПКС) [6,7]. Его идея заключается в использовании метода максимального правдоподобия с моделью помехи в виде набора произвольных ортогональных диад, с помощью которых можно описать любой набор источников линейно независимых когерентных (в пространстве) помех. Эти диады определяются из принятого сигнала и впоследствии используются при формировании матрицы $\mathbf{R}$. Также для его реализации используется предложенный позже оригинальный метод оценки числа источников помех [8].

2 Принцип отображения выделенного сигнала из каждой точки пространства в виде цветной точки на акустическом портрете

Как говорилось выше, обычно акустические камеры строят распределение интенсивности акустического сигнала для каждой точки пространства. То есть акустическое изображение получается монохромным. Вместо этого можно выделенному из каждой точки сигналу ставить в соответствие цветную точку. Каждый сигнал имеет некоторый спектральный состав. Если бы сигнал имел в своем составе единственную частоту (дискретную составляющую), можно было бы понятным способом сопоставить этому сигналу некоторый цвет из видимого оптического спектра. То есть просто отобразить весь диапазон принимаемых звуковых частот на видимый оптический диапазон. Известно, что цветная точка на экране ЭВМ может кодироваться, например, с помощью трех цветовых координат RGB, что соответствует доли каждого из трех основных цветов. Существуют также и другие цветовые координаты. Интуитивно кажется, что для рассматриваемой задачи наиболее подходящими являются координаты HSV, где H – это Hue (тон), S – это Saturation (насыщенность), V – это Value (значение). Эти координаты положительные и лежат в интервале [0,1]. При этом первая координата «тон» отвечает за цвет. Вторая координата отвечает за «насыщенность», что можно назвать чистотой цвета, и третья координата представляет собой интенсивность (яркость). Координаты HSV могут быть однозначно преобразованы в RGB. Для определения координаты H по выделенному сигналу

предлагается использовать функцию, которая дает некоторый центр тяжести оценки спектра сигнала. То есть единственное значение частоты с нормировкой от 0 до 1, где 1 это $F_s/2$, F_s – частота дискретизации. А именно:

$$\mathrm{H} = \frac{2}{F_s} \frac{\int_0^{F_s/2} fP^k(f)df}{\int_0^{F_s/2} P^k(f)df}, \qquad (2)$$

где $P(f)$ – оценка спектральной плотности мощности выделенного сигнала, k – параметр, позволяющий в нужной степени подчеркнуть максимальное значение спектра (при больших k, оценка H приближается к глобальному максимуму спектра). Интенсивность V логично ввести просто как нормированную на максимум энергию сигнала $\mathrm{V} = \frac{1}{\mathrm{V}_{\max}} \int_0^{F_s/2} P(f)df$. Координату S, по-видимому, имеет смысл связать с остротой или шириной спектра, если речь идет про хорошо выраженный спектральный максимум. Этот вопрос требует дополнительной проработки, пока будем считать эту величину равной 1 для всех точек акустического портрета.

3 Результаты численного моделирования

Для проверки идеи построения цветных акустических изображений было проведено численное моделирование. В качестве приемной системы рассматривалась планарная решетка из 120 микрофонов (10 на 12 приемных элементов) с межэлементным расстоянием 5 см. Полоса принимаемого сигнала составляла примерно от 0 до 6000 Гц. Моделировались два источника звука, разнесенные на 26° по азимуту и находящихся на нулевом угле места. В качестве сигналов источников использовалась речь человека (два разных текста разных людей) длительностью примерно 3 с. При обработке весь сигнал разбивался на узкие полосы шириной примерно в 200 Гц, после чего в каждую точку в диапазоне углов 60°–120° по азимуту и -30°–30° по углу места осуществлялось формирование диаграммы направленности двумя способами: методом суммирования с задержками и методом МПКС. Размер сетки по обоим углам составлял 50 на 50 точек. На рис. 1 показаны цветные акустические портреты, полученные описанным выше способом. Слева показан результат для обычного формирования диаграммы направленности (суммирование с задержками), справа – для метода МПКС. Цветная шкала на рис. 1 соответствует диапазону частот от 0 до 3 кГц, что примерно соответствует границам частотного диапазона речи. Отметим также, что третья координата V (интенсивность) строилась для диапазона частот 1кГц–6кГц. Это позволило достичь разрешения источников с помощью обычного формирования диаграммы направленности.

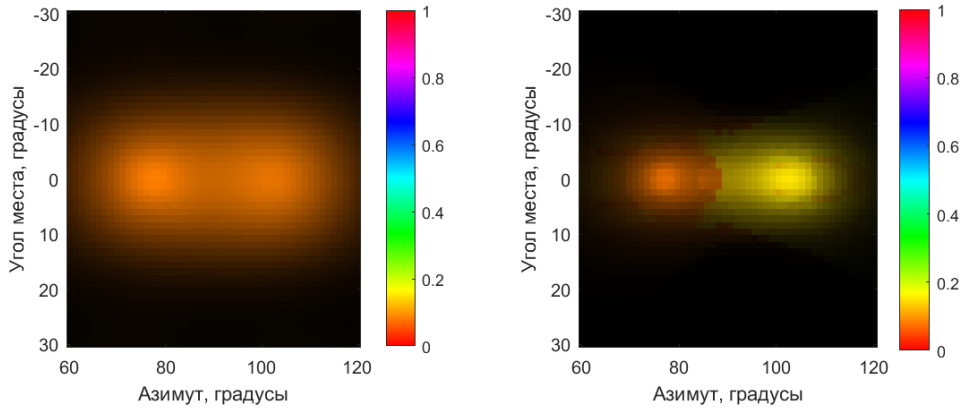


Рис. 1. Цветные акустические портреты, полученные описанным выше способом с помощью формулы (2). Слева показан результат для обычного формирования диаграммы направленности (суммирование с задержками), справа – для метода МПКС.

Из рис. 1 (слева) видно, что обычный метод формирования позволяет разрешить источники, но использование цветовой координаты не позволяет различить их спектральный состав. Ситуация другая для метода МПКС (правая часть рис. 1). Здесь повышенное пространственное разрешение и адаптивное формирование диаграммы направленности позволяет по цвету определить спектральный состав выделенных сигналов источников. На рис. 2. приведен коэффициент корреляции выделенного сигнала и истинного сигнала источника при формировании диаграммы направленности в направлении источников 1 и 2. Слева показан результат для обычного формирования диаграммы направленности (суммирование с задержками), справа – для метода МПКС.

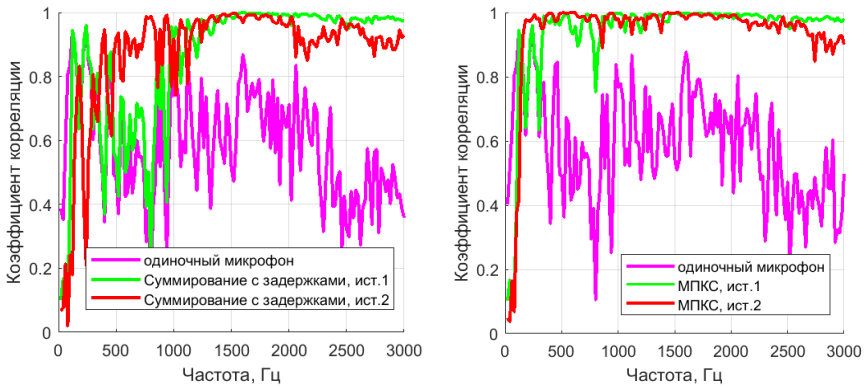


Рис. 2. Коэффициент корреляции выделенного сигнала и истинного сигнала источника при формировании диаграммы направленности в направлении источника 1 и 2. Слева показан результат для обычного формирования диаграммы направленности (суммирование с задержками), справа – для метода МПКС.

Из рис. 2 хорошо видно, что в диапазоне частот до 1 кГц метод МПКС намного лучше позволяет выделить сигналы источников. С учетом того, что спектр речевых сигналов имеет максимум в районе 500 Гц и далее спадает, эта разница оказывается принципиальной.

Заключение

В работе рассмотрена возможность построения цветных акустических изображений с использованием планарных антенных решеток микрофонов. Предложен способ «раскрашивания» акустического портрета за счет ассоциации «центра тяжести» спектра выделенного из каждой точки пространства сигнала с цветом палитры в координатах HSV. С помощью численного моделирования продемонстрировано, как формируется цветной акустический портрет для двух речевых источников с использованием двух методов выделения полезного сигнала. Показано, что использование адаптивного метода является более перспективным при построении цветных акустических изображений, поскольку этот метод правильно передает сигналы источников.

Работа выполнена в рамках госзадания ИПФ РАН по теме FFUF-2024-0040.

Список литературы

1. *J. Billingsley* The acoustic telescope// J. Sound Vib. 48 (48) (1974) 485–510.
2. *Chiariotti P., Martarelli M., Castellini P.* Acoustic beamforming for noise source localization–Reviews, methodology and applications //Mechanical Systems and Signal Processing. – 2019. – Т. 120. – С. 422–448.
3. *E.C. Cabada, N. Hamzaoui, Q. Leclère, J. Antoni* Acoustic imaging applied to fault detection in rotating machine, in: Surveillance 8, International Conference – October 20–21, 2015, no. 8, 2015.
4. *A. Schmitt, L. Lamotte* Source identification inside cabin using inverse methods, in: 3rd Berlin Beamforming Conference – 3rd BeBeC, 2010
5. https://patents.google.com/patent/CN101916569A/en
6. *Родионов А.А. Турчин В.И.* Обработка сигналов в антенных решетках на основе модели помехи, включающей корреляционную матрицу неполного ранга // Изв. Вузов. Радиофизика, 2017. Т. 60. № 1. С. 60–71.
7. *Иваненков А.С., Родионов А.А.* Адаптивное выделение сигналов с помощью решеток микрофонов на фоне набора источников интенсивных помех // Изв. Вузов. Радиофизика, 2018. Т. 61. № 3. С. 214–227.
8. *Иваненков А.С., Родионов А.А., Савельев Н.В.* Определение эффективного числа источников помехи в задаче адаптивной оценки временных форм узкополосных сигналов с помощью антенных решеток // Изв. Вузов. Радиофизика, 2019. Т. 62. № 3. С. 228–240.

УДК: 534.8 + 004.021 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39750

МЕТОДОЛОГИЯ ПРИМЕНЕНИЯ БОЛЬШИХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ ПРИ СОЗДАНИИ ПРИКЛАДНЫХ РАСЧЁТНЫХ ПРОГРАММ В ОБЛАСТИ АТМОСФЕРНОЙ АКУСТИКИ

Н.П. Красненко[1, 2, a], Д.С. Раков[1. 3 ,b]

[1] *Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск, Россия.*

[2] *Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия.*

[3] *Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Радар ммс», г. Санкт-Петербург, Россия.*

E-mail: [a] krasnenko@imces.ru, [b] rakov_ds@radar-mms.com

Аннотация: В докладе рассматриваются практические аспекты применения больших языковых моделей (LLM) при разработке прикладного программного обеспечения для решения задач атмосферной акустики. Особое внимание уделено методологии диалога разработчика с языковой моделью, позволяющей ускорить проектирование алгоритмов, автоматизировать генерацию программного кода и обеспечить формализацию физических моделей распространения звука в атмосфере. Представлены результаты разработанных программных продуктов: программы расчета акустических антенных решеток; калькулятора расчёта атмосферного поглощения звука с учётом частоты, метеорологических параметров и дистанции распространения; а также программного продукта для моделирования антенной системы акустического локатора. Показано, что использование LLM на этапах проектирования архитектуры, формализации расчётных моделей, генерации и оптимизации кода позволяет существенно сократить сроки разработки, снизить количество логических ошибок и повысить воспроизводимость вычислительных процедур. В докладе анализируются преимущества и ограничения данного подхода, требования к валидации результата и роль экспертного контроля со стороны разработчика при применении генеративных инструментов в инженерных расчётах. Полученные результаты демонстрируют перспективность интеграции больших языковых моделей в процессы разработки научно-инженерного ПО для задач атмосферной акустики и акустического зондирования приземного слоя атмосферы.

Ключевые слова: LLM; искусственный интеллект; кодогенерация; диалог; разработка; алгоритмы; моделирование; валидация; атмосфера; акустика; поглощение; распространение; антенные решётки; содар; направленность излучения.

METHODOLOGY FOR THE APPLICATION OF LARGE LANGUAGE MODELS IN THE DEVELOPMENT OF APPLIED COMPUTATIONAL SOFTWARE IN ATMOSPHERIC ACOUSTICS

N.P. Krasnenko[1, 2, a], D.S. Rakov[1, 3, b]

[1] *Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia.*

[2] *Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia.*

3 *Joint Stock Company "Scientific and Production Enterprise 'Radar MMS'", Saint Petersburg, Russia.*

E-mail: [a]krasnenko@imces.ru, [b]rakov_ds@radar-mms.com

Abstract: This paper considers practical aspects of applying large language models (LLMs) in the development of application software for atmospheric acoustics problems. Particular attention is paid to the methodology of interaction between the developer and the language model, which enables accelerated algorithm design, automated code generation, and formalization of physical models of sound propagation in the atmosphere.

The results of developed software tools are presented, including: a program for calculating acoustic antenna arrays; a calculator for atmospheric sound absorption accounting for frequency, meteorological parameters, and propagation distance; as well as a software system for modeling the antenna configuration of an acoustic locator.

It is demonstrated that the use of LLMs at the stages of architectural design, formalization of computational models, and code generation and optimization significantly reduces development time, decreases the number of logical errors, and improves the reproducibility of computational procedures.

The paper analyzes the advantages and limitations of this approach, outlines requirements for result validation, and emphasizes the role of expert supervision in the use of generative tools for engineering calculations. The obtained results demonstrate the potential of integrating large language models into the development processes of scientific and engineering software for atmospheric acoustics and acoustic sounding of the atmospheric boundary layer.

Keywords: LLM; artificial intelligence; code generation; human–AI interaction; software development; algorithms; modeling; validation; atmosphere; acoustics; absorption; propagation; antenna arrays; SODAR; directivity.

PACS: 43.60 Vx

Введение

Современное развитие вычислительных технологий и методов искусственного интеллекта

приводит к существенной трансформации процессов разработки программного обеспечения, обеспечивая переход от ручного программирования к применению интеллектуальных систем на основе искусственного интеллекта. Особое место в данном процессе занимают большие языковые модели (Large Language Models, LLM), способные выполнять задачи генерации программного кода, анализа алгоритмов и формализации текстовых описаний. Данный подход получил развитие благодаря появлению инструментов, основанных на LLM, таких как GitHub Copilot, OpenAI Codex, ГигаЧат от Сбербанка [1-3] и аналогичные системы.

В области атмосферной акустики разработка прикладного программного обеспечения традиционно связана с реализацией сложных физических моделей распространения звука, а также расчетом параметров акустических антенных систем, включая системы акустического зондирования атмосферы (содар) и системы звукового вещания. Решение данных задач требует высокой точности алгоритмов, строгой формализации моделей и тщательной валидации результатов.

В настоящей работе рассматривается методология применения больших языковых моделей при разработке программного обеспечения для расчета параметров акустических антенных решеток, защищенных параболических антенн, а также калькуляторов атмосферного ослабления звука. Дополнительно анализируются преимущества, ограничения и особенности использования данного подхода в задачах инженерных расчетов.

1 Методология использования больших языковых моделей при разработке программного обеспечения

В отличие от традиционного подхода, при котором разработчик последовательно выполняет формализацию задачи, проектирование архитектуры и реализацию алгоритма вручную, LLM-ориентированная разработка носит диалоговый и итерационный характер. Разработчик формулирует задачу на естественном языке, задает ограничения, указывает входные и выходные параметры, после чего модель предлагает промежуточные представления: структуру программы, отдельные функции, вычислительные процедуры, схемы взаимодействия модулей или тестовые сценарии.

С методологической точки зрения использование LLM при разработке прикладного научно-инженерного программного обеспечения целесообразно рассматривать как последовательность нескольких взаимосвязанных этапов.

1.1. Постановка задачи

Практика использования современных кодогенерационных моделей показывает, что качество результата существенно зависит от полноты постановки задачи, контекста и точности инструкции. В рекомендациях по использованию Codex-моделей и в исследованиях

по промпт инженирингу для генераторов кода подчеркивается необходимость задавать модели цель, ограничения, формат ответа, структуру проекта, критерии корректности и желаемый способ проверки.

1.2. Семантическая декомпозиция задачи и построение структуры программного решения

Разбиение исходной задачи на совокупность более простых подзадач необходима для уменьшения числа ошибок, потере управляемости и затруднению последующей верификации при большом объеме итогового кода.

1.3. Генерация программного кода и использование ИИ-ассистентов разработки

Следующий этап связан с непосредственной генерацией программного кода. Здесь могут применяться как встроенные в IDE ассистенты, например GitHub Copilot, так и отдельные agentic-системы класса Codex, способные работать с файлами проекта, выполнять связанные задачи, предлагать исправления и формировать изменения в кодовой базе.

1.4. Итерационное уточнение, отладка и рефакторинг

Полученный в ходе разработки код редко используется в исходном виде; как правило, он проходит через несколько циклов уточнения, исправления и оптимизации. В этом процессе необходим поиск логических ошибок, рефакторинга, улучшения читаемости, типизации, добавления комментариев, написания модульных тестов и подготовки технической документации.

1.5. Типовые ошибки при использовании LLM в научно-инженерном программировании

Несмотря на очевидные преимущества, использование больших языковых моделей в программировании связано с рядом систематических ограничений и ошибок.

К числу наиболее характерных ошибок относятся:

1. **Синтаксически корректный, но логически неверный код.** Модель может предложить реализацию, которая компилируется, но не соответствует математическому смыслу задачи.
2. **Упрощение или искажение физической модели.** При недостаточно точной постановке задачи возможна подмена требуемой модели более простой или более распространенной в обучающих данных.
3. **Галлюцинации.** Модель может начать генерацию несуществующих функций, библиотек, параметров API или методов, внешне выглядящих правдоподобно.
4. **Потеря контекста при длинной итерации.** В сложных проектах модель может начать противоречить ранее заданным требованиям, особенно если архитектурные

ограничения не были зафиксированы явно. Данная ошибка начинает часто возникать при отработке какого-нибудь алгоритма, который требует постоянного уточнения.

5. **Низкая воспроизводимость ответа.**
   Изменение формулировки запроса, порядка инструкций или уровня детализации может приводить к различным вариантам реализации.

Для научно-инженерных приложений эти ограничения имеют принципиальное значение, поскольку ошибка может проявиться не только в виде дефекта программы, но и в виде искаженного физического результата.

1.6. Валидация как обязательный этап методологии

Ключевое отличие применения LLM в научно-техническом программировании от использования ИИ в типовой прикладной разработке состоит в обязательности содержательной валидации результата. Валидация должна включать по меньшей мере три уровня проверки: программную, математическую и физическую.

На программном уровне проверяются корректность исполнения, обработка исключений, стабильность вычислений и прохождение тестов. На математическом уровне контролируется правильность реализации формул, граничных условий, размерностей и вычислительных процедур. На физическом уровне анализируется соответствие результатов ожидаемому поведению модели, данным эксперимента, аналитическим оценкам или известным частным случаям.

2 Техническая реализация программных продуктов в области атмосферной акустики

2.1 Калькулятор расчета атмосферного ослабления звука по ГОСТ 31295.1-2005 [4]

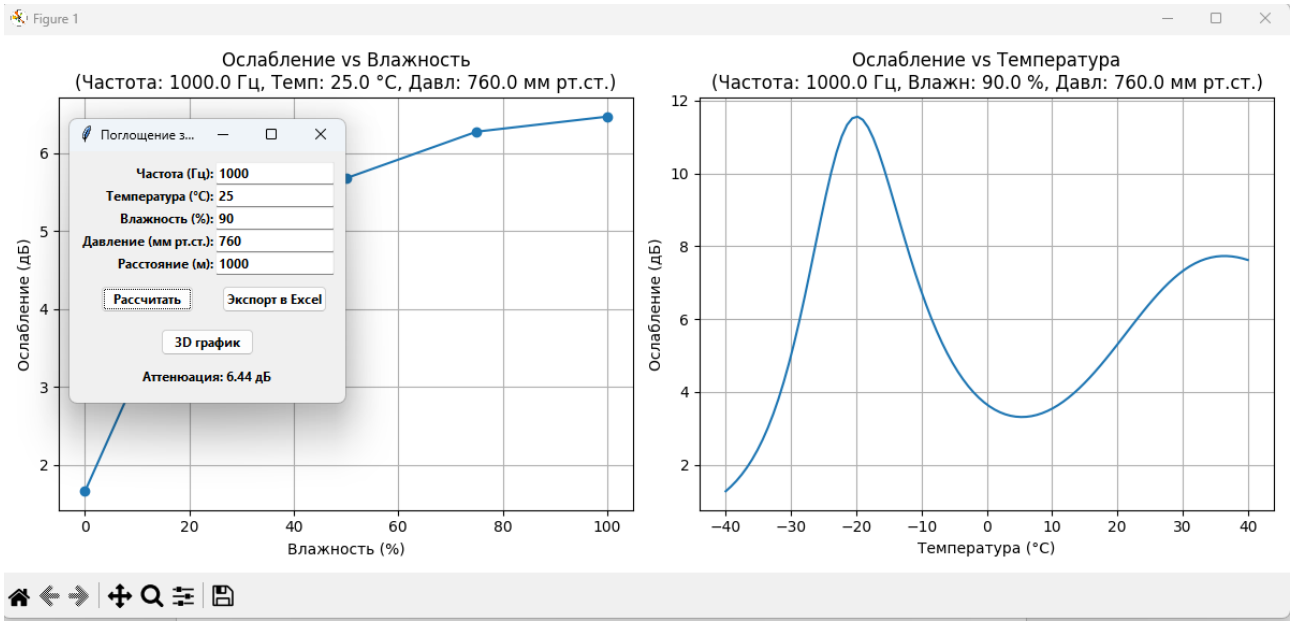


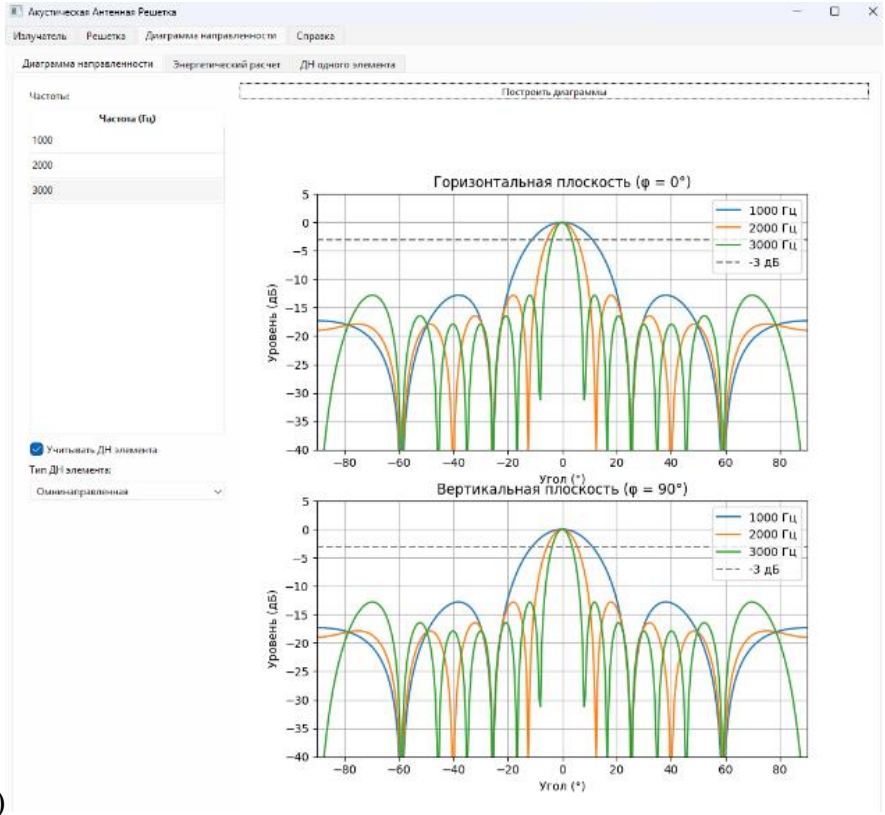
Рисунок 1. Интерфейс программного обеспечения расчета атмосферного поглощения звука

При разработке калькулятора, основной задачей, которую решал разработчик, являлась постановка корректного ТЗ, описание требуемого графического интерфейса, верификация итогового результата. Дополнительно в разработанном калькуляторе реализована возможность вывода на экран в виде графической зависимости кривых ослабления звука в зависимости от температуры, влажности.

На рисунке 1 показан графический интерфейс программного обеспечения и результат его работы.

2.2 Программа расчета акустических антенных решеток

Программа для расчета акустических антенных решеток, работающих в слышимом диапазоне частот разрабатывалось исходя из того, что пользователю должна быть предоставлена возможность задания следующих параметров: выбора геометрической конфигурации антенной решетки, диапазона рабочих частот решетки, количества элементов в решетке, в частности задания количества по строкам и столбцам, габаритных размеров единичного излучателя, межэлементного расстояние (шаг решетки). На их основе требуется провести расчет характеристик направленности антенной решетки.



а)

Рисунок 2. Интерфейс программного обеспечения расчета акустических антенных решеток

Алгоритм расчета диаграммы направленности решетки строится по классической схеме, учитывающей геометрические соотношения и размеры в антенной решетке и длину волны соответствующего излучения в воздухе [4-7].

Разработанный программный комплекс состоит из отдельных модулей отвечающих за: ввод и описание единичного излучателя антенной решетки, выбор геометрии проектируемой антенной решетки, расчет характеристик направленности антенной решетки.

На рисунке 2 показан графический интерфейс программного обеспечения и результат его работы. На разработанный программный продукт получено свидетельство о регистрации ПО для ЭВМ [8].

2.3 Программа расчета зеркальных параболических антенн для акустических локаторов

Одним из основных элементов содара, обеспечивающим его эффективную работу, является приемо-передающая антенна. Она должна иметь достаточно высокую направленность и низкий уровень боковых лепестков. Часто, особенно в отечественных содарах, используются зеркальные параболические антенны с рупорным громкоговорителем в качестве облучателя. По аналогии с программой расчета акустических антенных решеток было принято решение разрабатывать программу расчета зеркально параболических антенн для содара на основе отдельных модулей, отвечающих за: ввод исходных данных по облучающей системе зеркально-параболической антенны, исходных параметров для расчета параболического зеркала, расчет диаграммы направленности зеркально-параболической антенны, расчет звукозащитной бленды и итоговых характеристик направленности.

Расчет производился на основе классических формул расчета защищенных зеркально-параболических антенн [9-11].

На рисунке 3 показан графический интерфейс программного обеспечения на момент написания статьи.

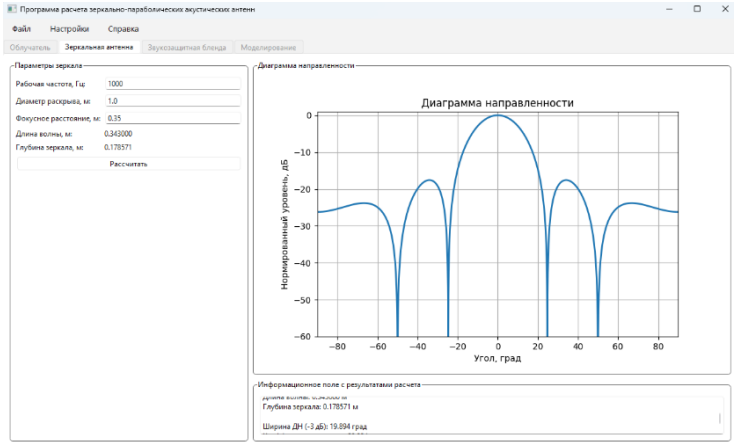


Рисунок 3. Интерфейс программного обеспечения расчета зеркально-параболических акустических антенн

Заключение

В работе описана методология взаимодействия разработчика с большими языковыми моделями. Показано, что внедрение диалоговой модели взаимодействия с LLM обеспечивает

возможность формализации сложных физических задач и автоматизации процессов разработки программного обеспечения.

В качестве примеров показаны результаты разработки прикладных программных продуктов для задач атмосферной акустики, реализованных с использованием больших языковых моделей.

В то же время выявлены существенные ограничения при использовании больших языковых моделей, к числу которых относятся необходимость обязательной валидации результатов, а также требования к наличию у разработчика глубоких знаний физических моделей и теоретических основ решаемых задач.

Особое внимание следует уделять точности постановки задачи для языковой модели, а также своевременному выявлению так называемых «галлюцинаций», проявляющихся в виде генерации несуществующих функций, библиотек и методов.

В целом полученные результаты подтверждают перспективность использования и интеграции больших языковых моделей в процессы разработки прикладного программного обеспечения, в том числе для решения задач атмосферной акустики.

Список литературы

1. GitHub Copilot. GitHub Copilot Documentation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://docs.github.com/en/copilot (дата обращения: 23.03.2026).
2. OpenAI Codex. OpenAI Codex Documentation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://platform.openai.com/docs/guides/code (дата обращения: 23.03.2026).
3 GigaChat. ГигаЧат. Документация [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://developers.sber.ru/docs/ru/gigachat/overview (дата обращения: 23.03.2026).
4. Fundamentals of Acoustics / L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens, J. V. Sanders. – 4th ed. – New York: Wiley, 2000. – 560 p.
5. Phased Array Antenna Handbook / R. J. Mailloux. – 2nd ed. – Norwood, MA: Artech House, 2005. – 517 p.
6. Acoustics / L. L. Beranek. – Melville, NY: Acoustical Society of America, 1993. – 608 p.
7. Антенные решетки. Методы расчета и проектирования / под ред. Л. С. Бененсона. – М.: Советское радио, 1966. – 367 с.
8. Красненко Н.П., Раков Д.С., Раков А.С. Программа расчета диаграммы направленности акустических антенных решеток // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025683456 от 25 сентября 2025 г.
9. Acoustic remote sensing applications/Ed. S.P. Singal. New Delhi, Narosa Publishing House, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1997. 585 p DOI: 10.1007/BFb0009557
10. Каллистратова М.А., Кон А.И. Радиоакустическое зондирование атмосферы. М.: Наука, 1992. 198 с.
11. Красненко Н.П. Акустическое зондирование атмосферы. Новосибирск: Наука, 1986. 167 с.

УДК: 534-6, 550.34.06, 550.34.09 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39751

Сравнительный анализ сейсмоакустических сигналов от землетрясений на Тайване 2024г. и на Камчатке 29 июля 2025г

Сорокин А.Г., Добрынин В.А., Ойнац А.В.

Институт солнечно-земной физики СО РАН,664033 Иркутск, ул. Лермонтова 126а, e- mail: sor@iszf.irk.ru

Аннотация. В работе представлены результаты сравнительного анализа откликов атмосферы в инфразвуковом диапазоне частот на поверхностную сейсмическую волну Рэлея от землетрясений M~7.7 на Тайване 3 апреля 2024 г, на Камчатке 29 июля 2025 с M~ 8.8. В работе представлены три группы сейсмических событий: а) ретроспектива мощных землетрясений с M~9, б) региональные события средней интенсивности с M~4.7-4.9 и с) удаленные сейсмические события с распространяющейся волной Рэлея.

Ключевые слова: атмосферный отклик на землетрясение, инфразвук, магнитуда, землетрясение, сейсмическая волна Рэлея

Comparative analysis of seismoacoustic signals from earthquakes in Taiwan in 2024 and Kamchatka on July 29, 2025

Sorokin A.G, Dobrynin V.A., Oinats V.A.

Institute of Solar-Terrestrial Physics SD RAS, Irkutsk, Lermontov str.126a, e-mail:sor@iszf.irk.ru

Abstract. The paper presents the results of a comparative analysis of atmospheric responses in the infrasound frequency range to the surface Rayleigh seismic wave from earthquakes M~7.7 in Taiwan on April 3, 2024, and in Kamchatka on July 29, 2025 with M~ 8.8. The paper presents three groups of seismic events: a) a retrospective of powerful earthquakes with M~9, b) regional events of moderate intensity with M~4.7-4.9, and c) remote seismic events with a propagating Rayleigh wave.

Keywords: atmospheric earthquake response, infrasound, magnitude, earthquake, Rayleigh seismic wave

Введение

Исследования в 60-х годах акустических сигналов от мощных импульсных источников показали, что возмущения в атмосфере могут возникать и после землетрясений, посредством динамической связи между сейсмической волной и атмосферой (Davies and Baker, 1965). Известны естественные источники волн давления, которые способны распространяться не только в нижней атмосфере, но и достигать ионосферных высот. Это акустические сигналы от сильных землетрясений, которые наблюдаются довольно редко и, поэтому, не были столь широко известны до события Великого Аляскинского землетрясения 1964 года. Аляскинское землетрясение 1964 г. (M~9.3) генерировало необычно длинный период атмосферных волн давления около 14 минут, которые были четко зарегистрированы в Беркли и нескольких

Калифорнийских инфразвуковых станциях (Donn, Posmentier, 1964; Mikumo, 1968). Число публикаций выросло после события в Индонезии, известного как Суматро - Андаманское землетрясение в декабре 2004 года (Astafieva, Afraimovich, 2006), а также сильнейшего землетрясения Тохоку (M~9) (Chen et al, 2011). Анализ данных показал, что возникающие акустические колебания включают три различных типа волн: акустические волны, генерируемые распространяющейся волной Рэлея, акустические волны из эпицентральной зоны и атмосферные гравитационные волны из эпицентра землетрясения.

i) Обзор акустических эффектов в атмосфере от крупнейших землетрясений

1. Великое Аляскинское землетрясение 1964 года

Аляскинское землетрясение произошло 27 марта 1964 года в 17:36 по местному времени (UTC-9) в 120 километрах от Анкориджа (Mikumo, 1968). Магнитуда землетрясения составила 9,3 по шкале Канамори. Очаг землетрясения располагался на глубине более 20 километров. После землетрясения были зафиксированы микроколебания атмосферного давления, происходившие одновременно с приходом сейсмических волн. В статье (Голицын, 1967) рассматриваются возмущения, распространяющиеся вдоль границы раздела двух сред – поверхности земли и атмосферы. Источником возмущений полагаются сейсмические волны Рэлея в пограничном слое земля-атмосфера. Роль волны Рэлея, как для события на Аляске 1964г (M~9.3), так и для события на Тайване 2024г. (M~7.7) - возбуждение акустической волны, уходящей в верхнюю атмосферу. Сравнительная оценка амплитуд инфразвукового сигнала на станции «Торы» ИСЗФ от землетрясения на Тайване 2024 г (M~7.7) и на станции Полисейдс, штат Нью – Йорк от землетрясения на Аляске 1964 г. (M~9.3) такова что, при примерно равных расстояниях распространения (~3400 км), амплитуды инфразвуковых сигналов, соответственно, равны 1.4 и 45 микробар.

2. Значимым событием является Суматро-Андаманское землетрясение 2004г

Великое землетрясение Суматра-Андаманское возникло в Индийском океане у западного побережья северной части острова Суматра в 00:58:53 UTC (время по МСК) 26 декабря 2004 года. Магнитуда землетрясения составила 9,3. Эпицентр с координатами 3,29° N; 95,78° E находился в Индийском океане, к юго-востоку от о. Суматра. Подъем земной поверхности оценивается смещением ~ 10 м. Используя сеть цифровых доплеровских зондов на Тайване, (Liu et al, 2006) обнаружили два типа возмущений ионосферы над Тайванем после Суматро - Андаманского землетрясения 2004 г. 1. Первое возмущение было вызвано в основном волнами Рэлея, которые состоят из пакета короткопериодических вариаций. 2. Второе возмущение представляет собой W-образный импульс продолжительностью около 30 минут. Важным

результатом является обнаружение четкой реакции ионосферы на землетрясение на большом расстоянии от эпицентра (3500 км).

3. Мощным сейсмическим событием является землетрясение Тохоку, 2011г

11 марта 2011 года в 05:46:23 UTC на северо-востоке острова Хонсю, Япония, произошло мощное землетрясение магнитудой 9,0 (эпицентральное местоположение 38.322° N, 142.369° E, глубина 32 км; По сведениям Геологической службы США NEIC http://on.doi.gov/jkjnap землетрясение привело к разрушению участка Японского желоба длиной ~300 км и шириной ~150 км, с максимальными смещениями на 35 м и более. Разлом породил мощное цунами, которое разрушило восточное побережье острова Хонсю.

ii) Атмосферные эффекты региональных землетрясений средней интенсивности в районе озера Хубсугул (Монголия) и на юго-западном фланге Байкальской рифровой зоны (рис. 1.б).

а) Акустический сигнал от землетрясения M~4.9 в акватории озера Хубсугул

Хубсугульское землетрясение произошло 5 декабря 2014 г. в северо-восточной части акватории оз. Хубсугул. По данным Байкальского филиала Федерального исследовательского центра единой геофизической службы РАН, время в очаге 18:04:19.7 UT, координаты 51,37° N. и 100,63° E, энергетический класс K = 13,9 (M~4.9). Через 21 мин после основного землетрясения последовал второй толчок меньшей энергии - K = 11,9.

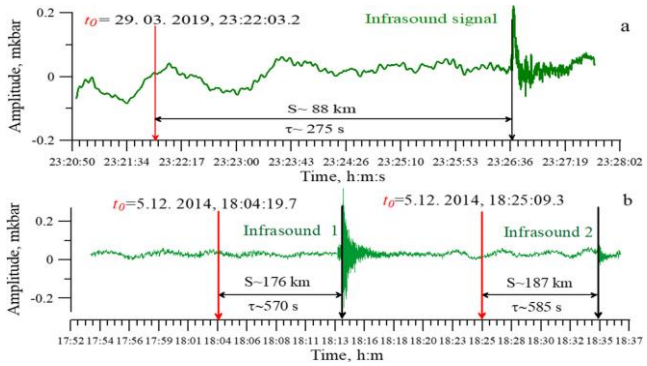


Рис.1. Данные инфразвуковых сигналов после землетрясений 2019г на впадине Хойтогол (Бурятия) (а) и в акватории озера Хубсугул 2014г (б). Инфразвуковые сигналы (Infrasound 1 - главный сигнал, Infrasound 2- инфразвуковой сигнал от афтершока землетрясения в акватории озера Хубсугул (б).J.Seismol (2020) 24:1291 https://link.springer.com/article/10.1007/s10950-020-09945-0

Землетрясения локализованы в Хубсугульской впадине, глубина оз. Хубсугул в эпицентральной области достигает 100-150 м. Особенностью этих землетрясений является о то, что сейсмические волны Рэлея не проявлялись явно в расположении инфразвуковой станции, а наблюдался только основной инфразвуковой сигнал. Этот сигнал был зарегистрирован инфразвуковой станцией Торы (ИСЗФ СО РАН), расположенной в Торской впадине на расстоянии 160-175 км от эпицентра Хубсугульского землетрясения и его афтершока https://naukaru.ru/en/nauka/article/20914/view .

б) Атмосферные эффекты от регионального землетрясения в районе впадины Хойтогол (юго-западный фланг Байкальской рифтовой зоны), 29.03.2019, 23:22:03.2 LT, Координаты эпицентра землетрясения 51.72° N; 101.52° E, с магнитудой M`~4.7 (Рис.1а).

Приведенные данные включают записи трех сейсмических событий на юго-западном фланге Байкальской рифтовой зоны, после которых последовали инфразвуковые волны, зарегистрированные микробарометрами ИСЗФ СО РАН и показанные на (рис. 1а, б).: Землетрясение в котловине Хойтогол, произошло в Тункинской рифтовая впадине (29.03.2019, 23:22:03.2, N 51,72°, E 101,52°, M ~ 4,7 http://www.seis-bykl.ru . В этом случае также не наблюдалась явная волна Рэлея, вероятно ее эффект из-за близкого расстояния был совмещен с основным инфразвуковым сигналом.

iii). Атмосферные эффекты от удаленных землетрясений (от волны Рэлея)

а) Землетрясение на Тайване 3.04.2024, M~ 7.7, эпицентр (23.23 N; 121.60 E)

Землетрясение на Тайване 3 апреля 2024 года явилось сильнейшим за 25 лет. Максимальная магнитуда – составила 7.7 по шкале Канамори. Эпицентр землетрясения находился в 1,5 км от побережья острова в море, вблизи города Хуалянь. Глубина гипоцентра землетрясения составила 15.5 км. Сообщалось, что максимальное ускорение грунта в районах близких к эпицентру землетрясения достигало более 800 см/сек^2. Расстояние от эпицентра землетрясения до точки наблюдения акустического отклика землетрясения в Сибири составляет≈ 3400 км. На рисунках Рис. 2 показаны сейсмические волны, а на Рис. 3 совмещенные и сглаженные сейсмическая волна Рэлея (А) и инфразвуковая волна, порожденная волной Рэлея (Б). На рис. 3. расстояние между сейсмической станцией (TLY) и инфразвуковой станцией ИСЗФ составляет около 33 км.

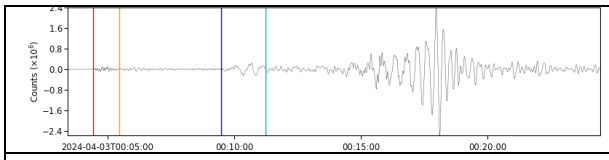


Рис. 2. Структура сейсмической волны VHZ полученная на станции («Талая»-TLY) по данным Сейсмологического центра (NSF) 03. 04. 2024г

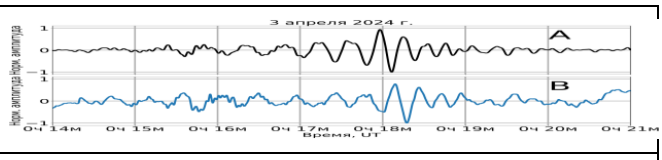


Рис. 3. Сопоставление времен появления сейсмической волны Релея (А) на станции «Талая» ИЗК СО РАН и инфразвукового сигнала (В) на акустической станции ИСЗФ

б) **Событие на Камчатке 29.07.2025, M~ 8.8, координаты эпицентра (52.473°N; 160.396°E**

Сильное землетрясение произошло у побережья Камчатки 29 июля 2025. Землетрясение зафиксировано в 23:24:52 UT. Эпицентр находился в точке 52.473°N; 160.396°E. Моментная магнитуда M составила 8.8, а гипоцентр ~ 47 км. Для совместного анализа используются данные поверхностной сейсмической волны Рэлея от землетрясения. Микроколебания приземного атмосферного давления воздуха, связанные с распространяющейся сейсмической

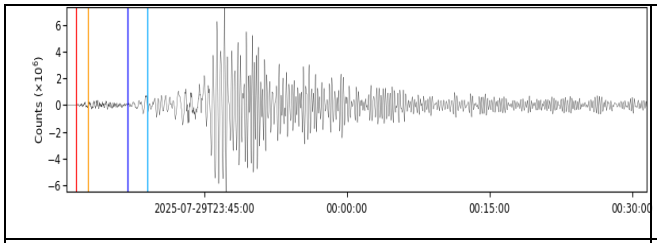


Рис. 4. Структура сейсмической волны VHZ полученная на станции (TLY) по данным Сейсмологического центра NSF 29.07.2025 г

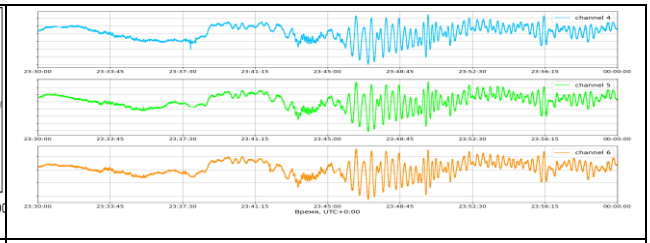


Рис. 5. Инфразвуковой сигнал от землетрясения на Камчатке 30 июля 2025г M~ 8.8, инфразвуковая станция ИСЗФ РАН

волной Рэлея, станции в обсерватории ИСЗФ СО РАН приведены на Рис. 5. Из рис. 3 и рис. 4. ясно видно, что атмосферный эффект от события на Камчатке (M~8.8) явно преобладает.

iiii**) Оценка частотно - зависимого инфразвукового отклика в атмосфере на сейсмическую волну Рэлея от удаленных землетрясений различной магнитуды**

Для сравнения атмосферного отклика на сейсмическую волны Рэлея был использован подход (Watada et al., 2006), который и был применен для оценки двух сильных землетрясений на Тайване, 2024 (M~7.7) и на Камчатке 2025 (M~8.8)

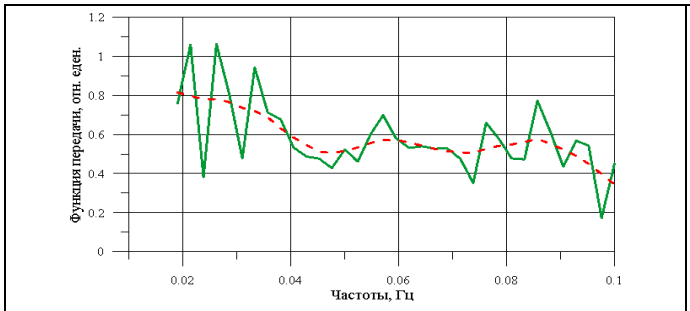


Рис.6а. Спектральный отклик инфразвуковой волны в атмосфере на сейсмическую волну Рэлея от события на Тайване 03.04 2024 г. с M~7.7. Расстояние до эпицентра 3450 км.

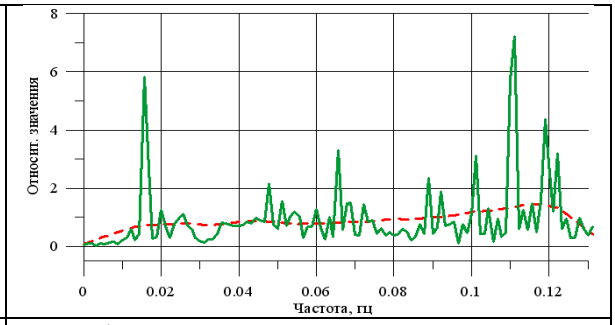


Рис.6б. Спектральный отклик инфразвуковой волны в атмосфере на сейсмическую волну Рэлея от события на Камчатке 29.07.2025г. M~8.8. Расстояние до эпицентра ~4000 км.

В данном подходе использовался метод спектрального отношения инфразвукового возмущения давления к вертикальной скорости движения грунта (волны Рэлея) в зависимости от частоты. Реальная функция трансформации сейсмического сигнала в инфразвуковое излучение была рассчитана на основе спектрального отношения возмущения давления к вертикальной скорости движения грунта в зависимости от частоты. Расчеты приведенные, на Рис. 6а и Рис. 6б показывают, что спектральный отклик инфразвуковой волны на сейсмическую волну от землетрясения на Камчатке в отличии от события на Тайване 2024 заметно преобладает как по частотному диапазону, так и по мощности.

Заключение. В работе приведен обзор наиболее интенсивных сейсмических событий с известными акустическими эффектами. В том числе представлены события регионального

характера. Особый интерес для дальнейшей работы представляют удаленные сейсмические события с интенсивным эффектом поверхностной волны Рэлея. Показаны эффекты от событий на Тайване 2024 г. и Камчатки 2025 г.

Список литературы

1. Davies K. и Baker D. M., Ионосферные эффекты, наблюдаемые во время землетрясения на Аляске 28 марта 1964 года. //J. Geophys. Res., 1965, Vol. 70, No. 9, 2251–2253).

2. W. L. Donn, E. S. Posmentier. Ground-Coupled Vol. 69, No. 24 DECEMBER 15, 1964 Air Waves from the Great Alaskan Earthquake

3. Takeshi Micumo. Atmospheric Pressure Waves and Tectonic Deformation Associated with the Alaskan Earthquake of March 28, 1964. //Journal of Geophysical Research Vol. 73, NO. 6, March 15, 1968

4. Elvira I. Astafyeva and Edward L. Afraimovich. Long-distance traveling ionospheric disturbances caused by the great Sumatra-Andaman earthquake on 26 December 2004. //Earth Planets Space, 58, 1025–1031, 2006

5. Chen et al, 2011.Long-distance propagation of ionospheric disturbance generated by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. //Earth Planets Space, 63,881–884,2011)

6. Г.С. Голицын, 1967. //Физика атмосферы и океана, ,Т III, N10

7. J. Y. Liu, et al 2006.. Giant ionospheric disturbances excited by the M9.3 Sumatra earthquake of 26 December 2004 //Geophysical Research Letters, Vol. 33, L02103, doi: 10.1029/2005GL023963, 2006

8. Shingo Watada et al., 2006. Atmosphere pressure change assotiated 2003 Tocachi-Oki Quake. //Geophysical Research Letters, Vol. 33, L24306, doi:10.1029/2006GL027967, 2006

9. Сорокин А.Г., Добрынин В.А., Ойнац А.В., Подлесный А.В., Цедрик М.В. Об эффекте сейсмической волны Рэлея в атмосфере от землетрясения на Тайване 3 апреля 2024 г. // Сборник Трудов XXXVII сессии Российского акустического общества. – М., ООО «Издательство «ГЕОС», 2025, С. 84-90. DOI:10.34756/GEOS.2025.17.39225.

10. В. Ойнац, М.В. Цедрик, И.Ю. Дюков, А.В. Подлесный, А.Ю. Белинская, А.А. Боровко, А.Г. Сорокин, В.А. Добрынин, П.А. Дергач. Обзор эффектов в ионосфере, вызванных прохождением сейсмической волны от землетрясения на Камчатке 30 июля 2025. //Russian Journal of Earth Sciences, N 2, 2026 (в печати).

Результаты работы получены с использованием оборудования ИСЗФ СО РАН, входящего в Центр коллективного пользования «Ангара» (http://ckp-rf.ru/ckp/3056/).

УДК: 519.63:533.6:551.511:536.75 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39752

Функционал волновой энергии в теории слабых решений уравнений Эйлера для стратифицированного газа

С.П. Кшевецкий[1,а], Н.М. Гаврилов[2,б]

[1] Россия, *Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, Москва, 119017*
[2] Россия, *Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034*
E-mail: [а]SPKshev@gmail.com , [b]n.gavrilov@spbu.ru

Аннотация: Рассматриваются численные методы решения системы уравнений гидродинамики для атмосферного газа, а также сопутствующие вопросы корректности постановки задачи. Динамика газа описывается уравнениями Эйлера в поле тяжести, потому что при анализе атмосферных волн с периодами от нескольких секунд до нескольких часов на высотах до 100 км вязкостью и теплопроводностью можно пренебречь. Кроме того, уравнения с диссипацией математически более просты для исследования. В линейной теории волн известен сохраняющийся функционал волновой энергии, на котором базируется математическое обоснование численных методов. Для нелинейного случая построен обобщенный функционал волновой энергии, также пригодный для исследования устойчивости.

Ключевые слова: гидродинамика, атмосфера, численные методы, устойчивость, стратификация, волны, нелинейность.

Wave Energy Functional in the Theory of Weak Solutions for Euler Equations of a Stratified Gas

S. P. Kshevetskii[1,a], N. M. Gavrilov[2,b]

[1] *A. M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, 3 Pyzhevsky Per., Moscow, 119017, Russia*
[2] *Saint Petersburg State University, 7/9 Universitetskaya Nab., Saint Petersburg, 199034, Russia*
E-mail: [а]*SPKshev@gmail.com* , [b] *n.gavrilov@spbu.ru*

Abstract: Numerical methods for solving the system of hydrodynamic equations for an atmospheric gas are considered, along with related issues concerning the well-posedness of the problem. The gas dynamics are described by the Euler equations in a gravity field. This

approach is motivated by the fact that when analyzing atmospheric waves with periods ranging from several seconds to several hours at altitudes up to 100 km, viscosity and thermal conductivity can be neglected. Furthermore, equations with dissipation are mathematically simpler to investigate. In linear wave theory, a conserved wave energy functional is known, which serves as the basis for the mathematical justification of numerical methods. For the nonlinear case, a generalized wave energy functional has been constructed, which is also suitable for stability analysis.

Keywords: hydrodynamics, atmospheric gas, numerical schemes, stability analysis, stratified flow, internal waves, nonlinear effects.

Введение

В современном моделировании атмосферных процессов используются такие системы численного прогнозирования и моделирования, как мезомасштабная модель WRF (NCAR/NOAA, США), российская блочная адаптивная система БАРС (ИВМ РАН), а также модели ICON-LAM/COSMO (Германия/Россия) и MPAS (США). Несмотря на широкое использование, эти системы имеют некоторые общие недостатки/проблемы, проистекающие из фундаментальных проблем математической теории уравнений гидродинамики.

В данной работе основное внимание уделяется исследованию недиссипативных уравнений, что продиктовано как физическими, так и вычислительными причинами. Хорошо известно, что влиянием молекулярной вязкости и теплопроводности на атмосферные волны с периодами от нескольких секунд до нескольких часов на высотах до 100 км можно пренебречь. Более того, при численном моделировании атмосферных явлений, диссипативные слагаемые реально влияют на численное решение только в том случае, если пространственный шаг сетки крайне мал. Наши оценки показывают, что для внутренних гравитационных волн (ВГВ) такой малый шаг должен составлять около 0.12 м у поверхности Земли, 2.2 м на высоте 40 км и 22 м на высоте 80 км. В то же время типичные вертикальные шаги в современных моделях высокого разрешения составляют от 10 до 500 м, а горизонтальные — от 1 до 10 км. Это на несколько порядков больше шагов, необходимых для корректного учета молекулярной диссипации.

Аналогичная ситуация с турбулентными процессами. Хотя в приземном слое турбулентная вязкость и теплопроводность значительны, они эффективно влияют на расчет только при шагах сетки порядка 30–100 м. В стратосфере (около 40 км) из-за низкой турбулентности на этих высотах необходимый для корректного учета турбулентной диссипации шаг численной схемы снижается до 10–25 м, и лишь в области мезопаузы (80–100 км) допустимые возрастают до 300–700 м.

Таким образом, используемые в численных моделях пространственные шаги обычно значительно превышают те, что требуются для физически корректного учета диссипации. Исключение составляет лишь приповерхностный слой (например, в модели WRF, где сетка сгущается до 10 м, турбулентная диссипация у поверхности Земли учитывается вполне корректно), однако выше, в районе 40 км, турбулентность практически отсутствует, что делает турбулентные диссипативные члены неэффективными. При существующих вычислительных ресурсах и разрешении сеток диссипация не оказывает существенного влияния на численные расчеты до высоты 100 км, что делает приоритетным изучение именно недиссипативных систем и их устойчивости.

1 Гидродинамические уравнения для недиссипативного газа в поле тяжести и постановка задачи

1.1 Рассматриваемые уравнения

Для недиссипативного идеального газа в поле тяжести:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial \rho u}{\partial x}+\frac{\partial \rho w}{\partial z} &= 0, \frac{\partial \rho u}{\partial t}+\frac{\partial \rho u^2}{\partial x}+\frac{\partial \rho u w}{\partial z}=-\frac{\partial p}{\partial x}, \\ \frac{\partial \rho w}{\partial t}+\frac{\partial \rho u w}{\partial x}+\frac{\partial \rho w^2}{\partial z} &= -\frac{\partial p}{\partial z}-\rho g, \frac{\partial}{\partial t}(\rho e)+\nabla(\rho e \vec{v})=0. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь ρ плотность; $p=\frac{\rho R T}{\mu}$ давление; $e=\left(\frac{u^2+w^2}{2}+g z+\frac{c_v T}{\mu}\right)$ удельная энергия; T температура; R универсальная газовая постоянная; c_V теплоемкость на киломоль; μ молекулярный вес; u горизонтальная массовая скорость; w вертикальная массовая скорость жидкости; t время; x, z горизонтальная и вертикальная координаты; g ускорение свободного падения. (Уравнения сохранения массы и движения - 1757 г Эйлер; Уравнение для внутренней энергии добавил Рудольф Клаузиус в 1850 году).

1.1 Область, в которой рассматриваются уравнения. Граничные условия и стратификация

Уравнения (1) рассматриваются для случая двух пространственный измерений. Случай трех измерений аналогичен.

Для упрощения атмосфера предполагается изотермической, то есть, температура T_0 атмосферы не зависит от высоты. Тогда плотность газа стратифицирована экспоненциально:

$$\rho_0(z)=\rho_{00}\exp\left(-\frac{z}{H}\right), H=\frac{R T_0}{g \mu}.$$

Реальная атмосфера Земли до высоты 80км близка к изотермической, $H\approx 8\text{км}$.

Уравнения рассматриваются в прямоугольной области Ω. Нижняя граница области Ω находится на поверхности земли. Граничные условия

$$(\vec{v},\vec{n})=0 \qquad (2)$$

на границе $\partial\Omega$ области Ω, где $\vec{v}=(u,w)$ и $\vec{n}$ нормаль к границе.

2 Известные проблемы математической теории недиссипативных уравнений и теория Лакса слабых решений

Исследования, проведенные в [1, 2, 3], показывают, что гладкие динамические решения уравнений гидродинамики существуют лишь в течение конечного времени, за исключением случаев тривиальных начальных данных или специальных условий (например, волн разрежения). По истечении этого времени решение перестает быть дифференцируемым. Таким образом, на больших временных интервалах классическое решение недиссипативных уравнений Эйлера практически всегда отсутствует.

2.1 Расширение понятия решения, обобщенные/слабые решения недиссипативных уравнений

Поскольку классические гладкие решения недиссипативных уравнений (1) существуют лишь в течение ограниченного времени, возникает необходимость расширения понятия решения. С этой целью используется концепция слабых (обобщенных) решений, предложенная Питером Лаксом (Peter Lax) [4, 5]. Основные положения этого подхода заключаются в следующем: a) слабое решение удовлетворяет не дифференциальным уравнениям, а соответствующим им интегральным соотношениям; b) любое классическое (гладкое) решение, пока оно существует, также удовлетворяет определению слабого решения; c) определение слабых решений базируется непосредственно на фундаментальных интегральных законах сохранения массы, импульса и энергии.

В литературе существуют различные формулировки слабых решений; наиболее распространенной является формулировка Лакса [4, 5]. Однако переход к слабым решениям несет ряд теоретических проблем, связанных с неединственностью определяемого слабого решения. Определение Лакса, вероятно, нужно дополнить какими-то условиями, чтобы решение было единственно, и при этом отвечало физическим требованиям. Условия, которыми мы дополняем определение слабых решений, выписаны выше. Они учитывают, что слабое решение не должно противоречить законам неравновесной термодинамики.

2.2 **Функции Ляпунова для аппроксимирующих дифференциально-разностных уравнений**

Для уравнений системы (1), дополненными указанными в предыдущем подразделе условиями, построена система аппроксимирующих дифференциальных по времени и разностных по пространственным переменных уравнений.

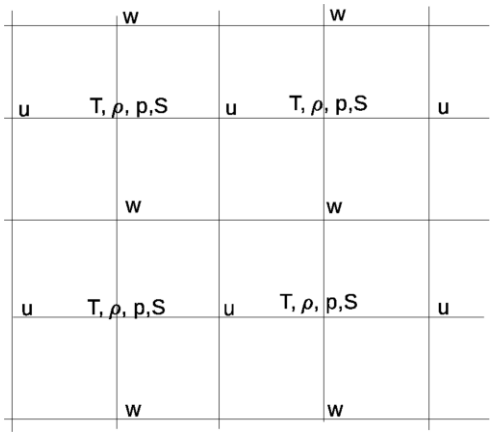


Рис.1 Разнесенная сетка «крест>» для численного решения уравнений. T,ρ,p,S определены в узлах с четными индексами i,k; u определена между узлами сетки с (T,ρ,p,S), в узлах с нечетным i; w определена между узлами с (T,ρ,p,S), в узлах с нечетным k.

Для решения аппроксимирующих уравнений доказана теорема.

Теорема.

Для предложенной системы дифференциально-разностных уравнений, аппроксимирующих уравнения системы (1) , при заданных граничных условиях (2) решение существует и устойчиво для всех $t>0$ при $\rho_{i,k}(t=0)>0$, $T_{i,k}(t=0)>0$, $H_{nonl}(t=0)<\infty$. Для этих уравнений существует функция Ляпунова H_{nonl}, которая является дискретным аналогом волновой энергии для нелинейных уравнений и для которого справедливо неравенство $\frac{dH_{nonl}}{dt}\leqslant 0$, где

$$H_{nonl}=4h^2(a+b+d)\geqslant 0,\qquad a=\sum_{\Omega}\left(\frac{\rho_{i,k}+\rho_{i+2,k}}{2}\frac{u_{i+1,k}}{2}^2\right)+\sum_{\Omega}\left(\frac{\rho_{i,k}+\rho_{i,k+2}}{2}\frac{w_{i,k+1}}{2}^2\right)+\sum_{\Omega}(g\rho_{i,k}z_k) \quad (3)$$

$$b=\frac{c_v}{\mu}\sum_{\Omega}(\rho_{i,k}T_{i,k}),\qquad d=-\frac{c_v}{\mu}\sum_{\Omega}\left(\rho_{i,k}T_0\left(\gamma-\ln\left(\frac{T_{i,k}}{T_0}\right)-(\gamma-1)\ln\left(\frac{\rho_{i,k}}{\rho_0(0)}\right)\right)+\sum_{\Omega}\rho_0(z_k)T_0(\gamma-1)\right)$$

Здесь суммирование ведется по внутренним четным узлам (i,k) сетки.

Использование функций Ляпунова для исследования устойчивости систем дифференциальных уравнений является классическим методом, изложенным в [6, 7].

На Рис.2 показан пример моделирования распространения волн , распространяющихся от источников, на основе разработанного математического метода и компьютерной программы.

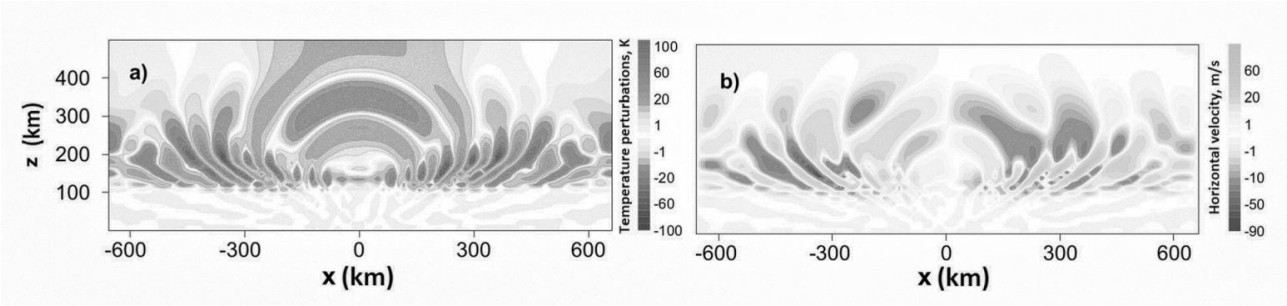


Рис. 2 . Численное моделирование возмущений температуры (а) и горизонтальной скорости (б) в вертикальной плоскости, вызванных акустическими и внутренними гравитационными волнами от тропосферных метеорологических источников.

Благодарности: Данная работа выполнена при частичной финансовой поддержке Минобрнауки, госзадания 125020501402-0 и 17.1. Анализ влияния закона неубывания энтропии на устойчивость численной схемы в разделе 2 был поддержан Российским научным фондом (грант № 25-17-00060).

Список литературы

1. *Kato T.* The Cauchy problem for quasi-linear symmetric hyperbolic systems. // Arch. Ration. Mech. Anal. 1975. **58**, N 3. P. 181.

2. Majda A. Compressible Fluid Flow and Systems of Conservation Laws in Several Space Variables. Springer. Berlin, 1984.

3. Рождественский Б.Л., Яненко Н.Н. Системы квазилинейных уравнений и их приложения к газовой динамике. Наука. М., 1978.

4. Lax P.D. Weak solutions of nonlinear hyperbolic equations and their numerical computation. // Comm. Pure and Appl. Math. 1954. **7**, N 1. P. 159.

5. Lax P.D. Hyperbolic systems of conservation laws. II. // Comm. Pure and Appl. Math. 1957. **10**, N 4. P. 537.

6. Ляпунов А.М. Общая задача об устойчивости движения. Государственное издание технико-теоретической литературы. М.–Л., 1950.

УДК 534.6.08 + 551.508.5 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39753

Методы шумоподавления в акустических доплеровских содарах: обзор алгоритмов обработки сигналов и современных технических решений

Красненко Н.П.[1,2)], Рыбаков И.А.[1)].

[1)] Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск, Россия;

[2)] Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия

E-mail: krasnenko@imces.ru, vaniarybakov98@gmail.com

Аннотация: В докладе представлен обзор современных методов шумоподавления, применяемых в акустических доплеровских содарах, используемых для дистанционного зондирования атмосферного пограничного слоя. Рассматриваются основные источники помех при акустических измерениях, включая промышленный, городской шум и др. Проведен анализ алгоритмов цифровой обработки сигналов, применяемых в коммерческих содарах различных производителей, таких как Metek, Remtech, Scintec, Atmospheric Research & Technology, Vaisala. Особое внимание уделено спектральным методам обработки доплеровского сигнала, многочастотным режимам измерений, пространственной фильтрации с использованием антенных решёток, временному и частотному усреднению, а также адаптивным процедурам контроля качества данных. Проведено сравнительное обобщение применяемых подходов, выявлены тенденции перехода от классических методов обработки к более сложным методам. Полученные результаты могут быть использованы при разработке новых алгоритмов шумоподавления и оптимизации обработки данных в акустических системах различного назначения.

Ключевые слова: содар, шумоподавление, цифровая обработка сигналов, доплеровский спектр, отношение сигнал/шум, антенные решетки.

Noise Reduction Methods in Acoustic Doppler SODARs: A Review of Signal Processing Algorithms and Modern Technical Solutions

N.P. Krasnenko[1,2)], I.A. Rybakov [1)].

[1)] Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia;

[2)] Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia

E-mail: krasnenko@imces.ru, vaniarybakov98@gmail.com

Abstract: This paper presents a review of modern noise reduction methods used in acoustic Doppler SODARs for remote sensing of the atmospheric boundary layer. The main sources of interference in acoustic measurements are considered, including industrial noise, urban noise, and others. Signal

processing algorithms implemented in commercial SODAR systems manufactured by Metek, Remtech, Scintec, Atmospheric Research & Technology, and Vaisala are analyzed. Particular attention is given to spectral methods of Doppler signal processing, multi-frequency measurement modes, spatial filtering using antenna arrays, temporal and frequency averaging, as well as adaptive data quality control procedures. A comparative synthesis of the approaches in use is provided, and current trends in the transition from classical processing methods to more advanced techniques are identified. The results may be useful for the development of new noise reduction algorithms and for optimizing data processing in acoustic systems designed for various applications.

Keywords: SODAR, noise reduction, digital signal processing, Doppler spectrum, signal-to-noise ratio, antenna arrays

PACS: 92.60.hv

Введение

Акустическое зондирование пограничного слоя атмосферы с помощью доплеровских содаров занимает уникальную нишу в дистанционной геофизике, предоставляя критические данные о скорости ветра, турбулентности и термической стратификации. Однако их широкое применение ограничено низким отношением сигнал/шум из-за мощных антропогенных и естественных помех [1-3]. В докладе представлен систематический обзор и сравнение методов шумоподавления и обработки сигналов, применяемых в содарах ведущих мировых производителей (Metek, Remtech, Scintec, Atmospheric Research & Technology, Vaisala). Анализ выполнен по трём уровням: аппаратные методы подавления помех на этапе приёма (фазированные решётки, звукозащитные экраны), алгоритмические методы цифровой обработки (спектральный анализ, многочастотное зондирование, фильтрация), а также процедуры контроля качества и валидации данных, позволяющие отбраковывать недостоверные измерения.

1 Методы шумоподавления в содарах

1.1 Metek

Немецкая компания METEK GmbH — ведущий производитель содаров, широко применяемых в науке и прикладных задачах, включая оценку ветроэнергетического потенциала и метеообеспечение авиации. Наибольшее распространение получили доплеровские содары серии PCS.2000 с максимальной дальностью зондирования до 1–1.5 км при благоприятных условиях. Для повышения отношения сигнал/шум реализован многочастотный режим (диапазон частот 1.4–2.6 кГц). Комбинация частот позволяет компенсировать разное затухание сигнала и расширяет динамический диапазон измерений. Конструктивно используются фазированные антенные решетки, например из 64 излучателей в модели PCS.2000-64, что обеспечивает формирование вертикального и наклонных лучей

без механического перемещения и снижает влияние помех вне основного лепестка диаграммы направленности [4].

Дополнительное повышение качества измерений обеспечивается аппаратным подавлением внешних шумов. Конструкция содаров включает акустические бленды и защитные экраны вокруг антенной решетки, которые снижают уровень фонового шума при приеме сигнала. На рис.1, а показана конструкция бленды с треугольными кромками на вершине корпуса.

Защитные экраны в содарных системах подавляют боковые лепестки диаграммы направленности и уменьшают прямое акустическое излучение вблизи земли и элементов конструкции. Они также ограничивают распространение энергии в боковых направлениях и снижают влияние отражений от окружающих объектов.

Важным фактором является дифракция звука на краях экрана, приводящая к появлению паразитных излучений. Край перегородки действует как совокупность вторичных точечных источников, формирующих сферические волновые фронты (рис. 1, б). Их суперпозиция создает интерференционную картину и увеличивает рассеяние энергии в виде боковых лепестков. Для снижения дифракции применяются акустические клинья — треугольные структуры с изменяющейся высотой кромки. Они уменьшают когерентность излучения вдоль края и снижают мощность дифрагированной волны в среднем на 6–7 дБ. Эффективность зависит от рабочей частоты и геометрии экрана. Геометрическая неоднородность нарушает согласованность фазового сложения дифрагированных волн, что снижает интенсивность дифрагированного поля.

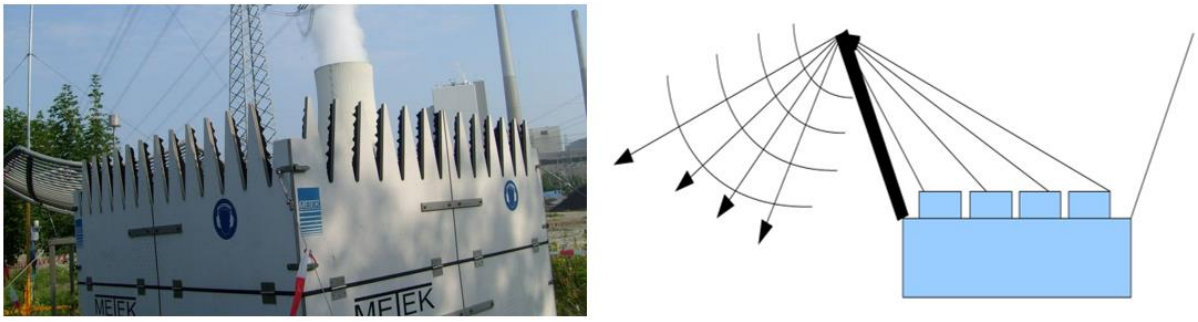


Рис. 1. Акустический экран: а — дифракционные клинья, б — дифракционная картина на краю экрана.

Основной метод обработки данных в доплеровских содарах METEK — спектральный анализ. После приема эхо-сигнал дискретизируется и разделяется по высотным интервалам. Для каждого интервала вычисляется спектр мощности с помощью БПФ [5]. По положению максимума мощности определяется доплеровская частота, пропорциональная радиальной скорости ветра. По нескольким лучам рассчитываются компоненты вектора скорости ветра.

Оценивается отношение сигнал/шум (ОСШ). Если ОСШ ниже порога, высотная ячейка исключается [4]. Результат очистки показан на рис. 2, а. Также доступен просмотр исходных данных без отбраковки (рис. 2, б).

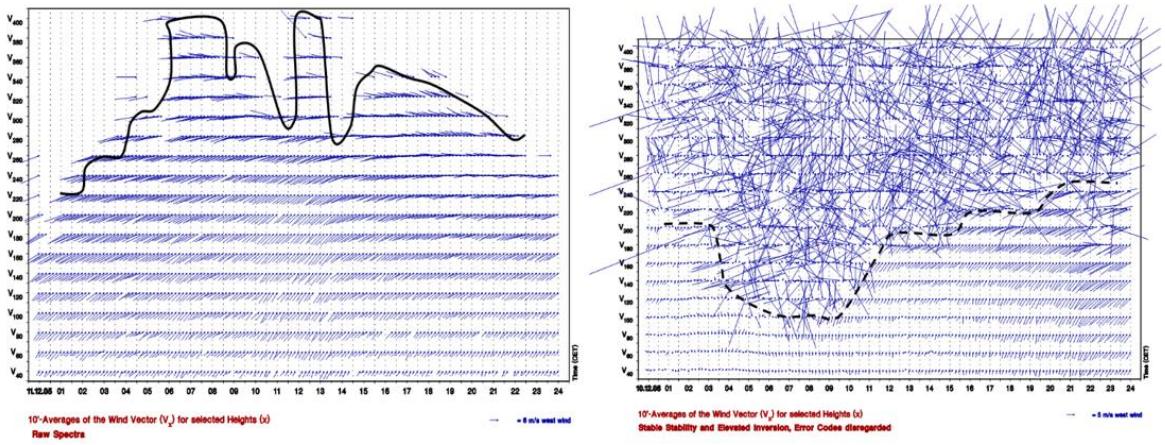


Рис. 2. Временной ряд усреднения ветра: а — с отбрасыванием “зашумленных” данных, б — без отбрасывания “зашумленных” данных.

Для повышения устойчивости применяется временное накопление: усреднение по нескольким импульсам и сглаживание между соседними ячейками. Это снижает влияние случайных шумов.

Предусмотрено подавление фиксированных эхо-сигналов от неподвижных объектов (зданий, мачт, деревьев), имеющих нулевой доплеровский сдвиг. Алгоритм выявляет устойчивые максимумы в области нулевого смещения, оценивает их вклад и вычитает соответствующую компоненту из спектра мощности.

1.2 Remtech

Французская компания Remtech — ведущий производитель доплеровских содаров в мире. По данным компании, на 23 августа 2019 года установлено более 600 комплексов в 55 странах [6]. Высота зондирования — от 400 м (компактные модели) до 3000 м (мощные системы). Рабочий диапазон частот — 1–5,5 кГц, что обеспечивает баланс между дальностью и размером антенны [6].

Например, компактная модель PA-XS использует частоту 5,5 кГц, антенна имеет размеры 24×24×4 см и массу 1,85 кг, общий вес — 7,3 кг [7]. Инженерные решения Remtech применяются во многих метеорологических исследованиях пограничного слоя атмосферы.

Remtech одной из первых внедрила цифровую обработку сигналов на основе БПФ, отказавшись от специализированных анализаторов спектра. В современных моделях (PA-XS, PA-5) используются ARM Quad Core процессор и 16-битный АЦП, обработка ведется методом БПФ после понижения частоты [7].

Ключевая технология — многочастотное кодирование сигнала [19]. В одном зондирующем импульсе одновременно передается несколько дискретных несущих частот (до 7–9 на каждый луч). Это повышает достоверность измерений профиля скорости ветра в условиях низкого отношения сигнал/шум.

Ключевая особенность метода — процедура согласования оценок. Алгоритм сравнивает скорости ветра, полученные на разных частотах. Если значение появляется только на одной частоте или существенно отличается от других, оно считается артефактом и исключается.

Использование нескольких несущих частот позволяет получать достоверные данные при более низком ОСШ. При пяти частотах эквивалентный выигрыш в чувствительности достигает 15–20 дБ [8], так как вероятность случайного ложного пика на нескольких частотах одновременно крайне мала. В содарах Remtech этот принцип реализован программно. Приемник формирует спектры для всех частотных каналов, алгоритмы сравнивают доплеровские оценки и применяют пороговые критерии. Система использует множество порогов ОСШ по лучам, высотам и частотам [6]. Технология применяется во всей линейке содаров (PA-XS, PA-0, PA-2, PA-5) и позволяет повысить устойчивость к помехам и увеличить энергетический потенциал импульса без ухудшения разрешения.

Спектральное вычитание шума реализуется за счёт предварительной оценки спектральной плотности шума по временным интервалам между зондирующими импульсами с последующим её вычитанием из спектра принимаемого сигнала, что позволяет существенно снизить влияние шумовых составляющих [7].

Для подавления стационарных отражений используется автоматическое выявление спектральных пиков вблизи нулевого доплеровского сдвига, которые повторяются в серии измерений. Их вклад вычитается из спектра, а в случаях, когда корректное восстановление сигнала невозможно, соответствующие высотные ячейки исключаются из дальнейшей обработки.

Дополнительно применяется временное накопление, заключающееся в усреднении по нескольким импульсам и интервалам наблюдения, что приводит к уменьшению дисперсии оценки доплеровской частоты и снижению влияния случайных шумов [6].

Формирование пространственной избирательности обеспечивается фазированной антенной решёткой, которая создаёт пять лучей с электронным управлением — один вертикальный и четыре наклонных; наклонные лучи отклоняются от вертикали на угол порядка 20–25° и разнесены по азимуту на 90°, что позволяет по доплеровским сдвигам в наклонных лучах определять горизонтальные компоненты скорости ветра, тогда как вертикальный луч используется для измерения вертикальной составляющей скорости.

1.3 Scintec

Немецкая компания Scintec AG — ведущий производитель акустических и радиоакустических систем зондирования атмосферы. Оборудование применяется для исследования пограничного слоя, ветроэнергетики, авиационной метеорологии и экологического мониторинга. Заявленный диапазон высот зондирования — 500–2000 м [9].

Содары семейства FAS используют плоскую фазированную антенную решетку из пьезоэлектрических преобразователей. Управление фазами позволяет формировать несколько направленных лучей. Типовая конфигурация включает вертикальный и четыре пары наклонных лучей [9], что обеспечивает измерение трех компонент скорости ветра по доплеровскому сдвигу. Многолучевой режим (до девяти направлений) повышает надежность оценок.

Для повышения достоверности используется многочастотное зондирование. В одном измерительном цикле излучается последовательность импульсов на нескольких частотах (до десяти) [9]. Диапазоны частот: 2525–4850 Гц, 1650–2750 Гц и 825–1375 Гц. Сигналы обрабатываются раздельно для каждой частоты. Согласованность оценок между частотами подтверждает надежность измерения (при расхождении результаты отбраковываются).

Цифровая обработка включает доплеровский анализ: для каждого дальномерного канала выполняется БПФ, по спектрам мощности вычисляются спектральные моменты [9].

Для повышения ОСШ оценивается уровень фонового шума на участках спектра без полезного сигнала, после чего вычисляется отношение сигнал/шум. Спектры накапливаются и усредняются по серии импульсов (1–60 мин), что снижает влияние шумовых флуктуаций. Автоматический контроль качества основан на минимальном ОСШ и проверке согласованности результатов между частотами и лучами. При противоречивых данных они исключаются из обработки. На рис. 3 показан участок времени 18–19, где из-за повышенного уровня шума данные были отброшены.

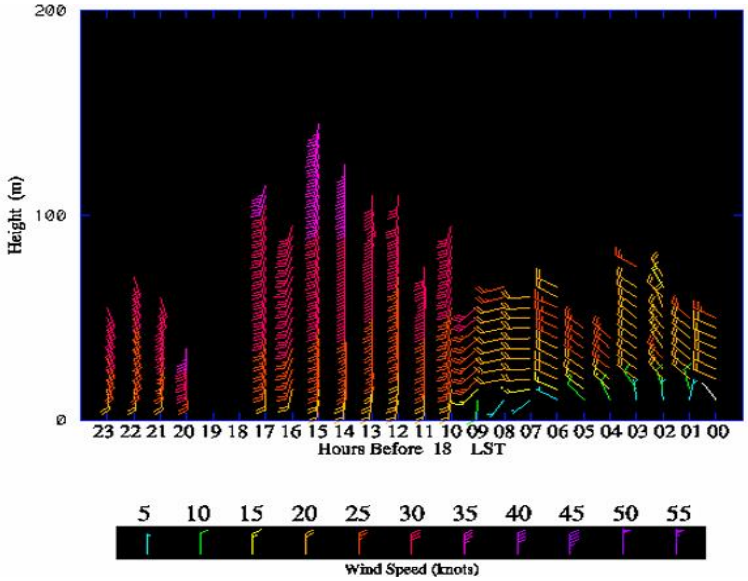


Рис. 3. Временной ряд усреднения скорости ветра с отбрасыванием “зашумленных” данных.

На этапе спектральной обработки реализовано автоматическое обнаружение и коррекция отражений от неподвижных объектов, что позволяет исключить их влияние при расчете скорости ветра.

Помимо алгоритмических методов, в содарах Scintec применяются конструктивные способы снижения шумов: установка антенны в акустический кожух или монтаж защитного экрана, уменьшающие влияние ветрового шума и турбулентности [10]. Также используются инверсные рупорные преобразователи, обеспечивающие согласование импеданса с атмосферой и защиту от осадков [9].

Программное обеспечение предоставляет доступ ко всем уровням данных — от «сырых» до обработанных профилей ветра, что позволяет применять собственные методы обработки и экспериментальные алгоритмы подавления шума.

Системы серии FAS обладают возможностью полностью автоматизированной самодиагностики, включающей контроль фазовых и амплитудных характеристик каждого акустического элемента. Индивидуальное управление преобразователями позволяет выполнять детальный анализ параметров излучения и определять угловые характеристики формирования девяти акустических лучей. Панель самотестирования представлена на рис. 4.

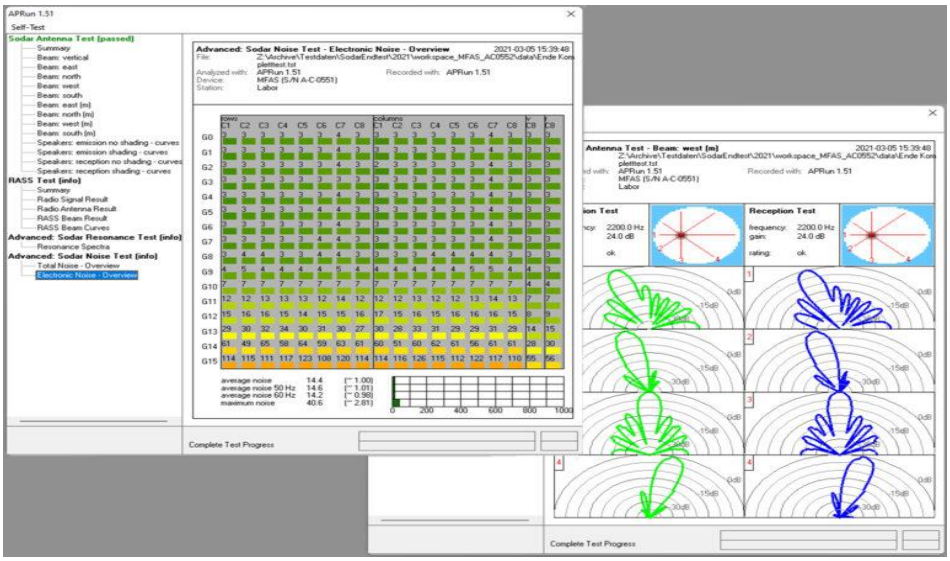


Рис. 4. Панель для самотестирования излучателей в антенной решетке

1.4 Atmospheric Research & Technology

Американская компания Atmospheric Research & Technology (ART) — производитель доплеровских содаров для измерения профиля ветра в нижней части пограничного слоя. Основана в 2000 году, специализируется на компактных мобильных системах для метеорологии, ветроэнергетики и экологического мониторинга.

Модель VT-1 — монопозиционный доплеровский содар с фазированной антенной решеткой. Диапазон измерений — от 15 до 300 м, частота зондирования — 4600 Гц [11].

Антенная система включает массив из 48 излучателей с управлением фазами (рис. 5, а). Ключевой элемент конструкции — рефлекторная плата, установленная под углом 35° к горизонтали (рис. 5, б). Ее наклон направляет луч слегка вниз, защищая элементы от дождя, снега и мусора. В холодном климате нагревается отражающая плата, а не решетка, что

предотвращает обледенение. Внутренняя поверхность корпуса облицована поглощающей пеной, внешняя — пенорезиной, что снижает боковые лепестки, уменьшает помехи и защищает от ветрового шума [11]. Такая конструкция позволяет формировать один вертикальный луч и два ортогональных горизонтальных луча.

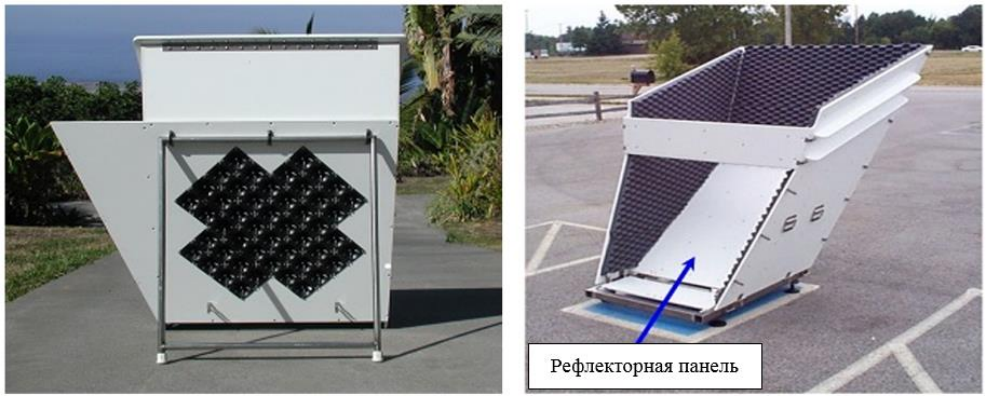


Рис. 5. Содар VT-1 фирмы Atmospheric Research & Technology: а — антенная решетка, б — рефлекторная панель

После приема сигнал оцифровывается АЦП и разбивается на дальностные ячейки. Для каждой ячейки вычисляется спектр мощности с помощью БПФ. Доминирующий пик соответствует доплеровскому сдвигу частоты от движения воздуха. Для повышения устойчивости применяется накопление и усреднение по нескольким импульсам; итоговые профили часто формируются с 10-минутным усреднением. Оценка ОСШ проводится для каждой высотной ячейки: при значении ниже установленного порога ячейка считается недостоверной и исключается из дальнейшего анализа [12].

В VT-1 реализовано автономное самотестирование антенной подсистемы [11] (рис. 6). Тест можно запускать локально, удаленно или по расписанию. Поочередно активируется каждый из 48 излучателей, приемный микрофон регистрирует отклик. Полная последовательность



Рис. 6. Панель самотестирования излучателей в антенной решетке содара VT-1.

занимает около 3 минут (доступна также проверка одиночного элемента). При выходе

значений за пороговые уровни сигнализируется неисправность. Если выявлено более пяти плохих элементов, автоматически формируется аварийное уведомление.

1.5 Vaisala

Содар Triton (Vaisala / Second Wind) — промышленная доплеровская акустическая система для ветроэнергетики и долговременного мониторинга ветрового режима. Применяется при выборе площадок для ветропарков и оценке ветроэнергетического потенциала. Типичная высота измерений — до 200 м.

Конструкция включает антенну с гексагональной конфигурацией излучателей и трехлепестковым корпусом (рис. 7). Используется трехлучевая схема: один вертикальный луч и два наклонных. Полный цикл зондирования по всем направлениям занимает около 6 секунд. Рабочая частота — 4500 Гц [15]. В конструкции предусмотрена отражающая панель, устанавливаемая под углом порядка 45° к вертикали. Такое конструктивное решение обеспечивает эффективное перенаправление акустического излучения и формирование наклонных зондирующих лучей.

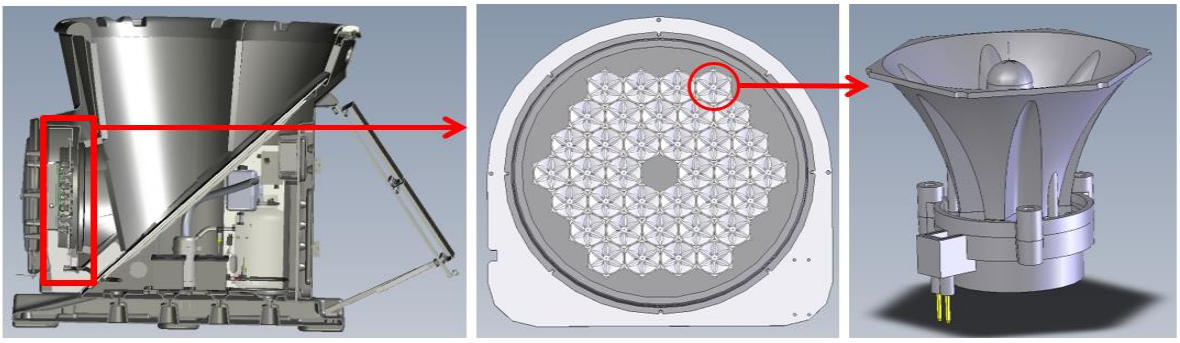


Рис. 7. Конструкция и расположение антенной решетки содара Triton.

Аппаратура рассчитана на автономную работу в полевых условиях. Прибор размещен в герметичном ударопрочном корпусе с защитой от осадков, пыли и перепадов температуры. Для работы в холодном климате предусмотрен обогрев (возможна установка каталитического пропанового нагревателя), а также виброизоляция и акустическое экранирование [14, 15].

Отраженный сигнал принимается, усиливается, оцифровывается и разбивается на временные интервалы, соответствующие высотным ячейкам. Для каждой ячейки вычисляется спектр мощности с помощью БПФ, определяется доплеровский сдвиг частоты. Спектры усредняются по последовательным импульсам для снижения шума. Применяются временное и вертикальное сглаживание: результаты, противоречащие физически допустимому профилю, исключаются как выбросы.

Выполняется оценка ОСШ с адаптивным порогом обнаружения [16]. Если ОСШ ниже порога, измерение признается недостоверным и исключается из итогового профиля.

Заключение

Проведенный анализ позволяет оценить текущее состояние и определить векторы развития

шумоподавления в содарах. Эволюция методов идет в сторону интеграции аппаратных и алгоритмических решений, а также повышения адаптивности систем зондирования.

Современный тренд — переход от пассивной фильтрации к цифровой обработке сигнала. Развитие ведется по трем направлениям:

1. Комбинирование подходов: лидеры рынка сочетают аппаратную защиту (фазированные решетки, акустические экраны) с продвинутыми алгоритмами (многочастотную и спектральную обработку).
2. Адаптивность: вместо жестких пороговых критериев внедряются статистические методы, способные в реальном времени отличать полезный сигнал от помех.
3. Рост вычислительных мощностей: использование ARM и FPGA позволяет реализовать сложную математическую обработку непосредственно в приборе в реальном масштабе времени.

Список литературы

1. *Красненко Н.П.* Акустическое зондирование атмосферного пограничного слоя. Томск: Издательство, 2001. 278 с.
2. *Bradley S.* Atmospheric Acoustic Remote Sensing: Principles and Applications. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2007. 296 p.
3. *Crescenti G.H.* The degradation of doppler sodar performance due to noise // Atmospheric Environment. 1998. Vol. 32, No. 9. P. 1499-1509.
4. Acoustic Sounder SODAR PCS2000-64 Product Description. Elmshorn: METEK GmbH.
5. Signal Analysis Doppler-SODAR MODOS DSDR3x7 DSDPA.90-24/-64 PCS-2000/-24/-64. Elmshorn: METEK GmbH.
6. Remtech Inc. URL: https://remtechinc.com/ (дата обращения: 12.03.2026).
7. Remtech Sodar Technical Description. URL: https://remtechinc.com/wp-content/uploads/DC02012_SODAR_TECHNICAL_DESCRIPTION_0.pdf (дата обращения: 12.03.2026).
8. Method of Remotely Determining the Three-Dimensional Velocity of a Fluid Such as Air or Water: Pat. 5,521,883 USA. 1996.
9. Scintec AG. URL: https://www.scintec.com/ (дата обращения: 12.03.2026).
10. Scintec Flat Array Sodars Installation and Operation Manual: SFAS, MFAS, XFAS. Rottenburg: Scintec AG (руководство).
11. Atmospheric Research & Technology. URL: https://sodar.com/ (дата обращения: 12.03.2026).
12. *Walls E., Rogers A., Manwell J. Eastham*: SODAR-Based Wind Resource Assessment // Proceedings of the American Wind Energy Association (AWEA) Windpower 2007 Conference. Los Angeles, 2007.
13. Triton SODAR Brochure. Vaisala Oyj. URL: https://www.sartelco.it/contenuti/download/EOLICO_WIND/Triton-Brochure.pdf (дата обращения: 12.03.2026).
14. Transducer Array Arrangement and Operation for Sodar Applications: Pat. WO2008108894A2. 2008.
15. Housings for Phased Array Monostatic Sodar Systems: Pat. US8456955B2 USA. 2013.
16. TRITON® SONIC WIND PROFILER Siting Guidelines. Vaisala Oyj, 2012. Version 2.2 (руководство).

УДК: 53.023; 53.091 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39754

Фронтовая область импульсных цилиндрических волн в атмосферной акустике

С.И. Косяков[1,a], С.Н. Куличков[1,b]

[1] *Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова Российской академии наук, Российская Федерация, 119017, Москва, Пыжевский пер, д. 3*

E-mail: [a]ksi1972.02@mail.ru, [b]snik1953@gmail.com

Аннотация: Исследуется структура фронтовой области импульсных цилиндрических волн в атмосферной акустике. Рассматриваются головные волны от летящих в атмосфере сверхзвуковых тел, взрывные волны от цилиндрических зарядов взрывчатых веществ. Показано, что ширина фронтовой области импульсных цилиндрических волн в атмосфере подчиняется универсальному (независимо от природы источника) закону энергетического подобия, записанного в цилиндрических координатах. Профиль давления во фронтовой области описывается выпуклой экспоненциальной функцией.

Ключевые слова: взрывная волна, головная волна, профиль давления, структура, фронтовая область, ширина.

The frontal region of pulsed cylindrical waves in atmospheric acoustics

S.I. Kosyakov[1,a], S.N. Kulichkov[1,b]

[1] *A.M.Obukhov Institute of Atmospheric Physics of the Russian Academy of Sciences, 3 Pyzhevsky Lane, Moscow, 119017, Russian Federation*

E-mail: [a]ksi1972.02@mail.ru, [b]snik1953@gmail.com

Abstract: The structure of the frontal region of pulsed cylindrical waves in atmospheric acoustics is investigated. The headwaves from supersonic bodies flying in the atmosphere, and explosive waves from cylindrical charges of explosives are considered. It is shown that the width of the front region of pulsed cylindrical waves in the atmosphere obeys the universal (regardless of the nature of the source) law of energy similarity written in cylindrical coordinates. The pressure profile in the frontal region is described by a convex exponential function.

Keywords: blast wave, head wave, pressure profile, structure, frontal area, width.

PACS: 02.60.Cb, 43.28.Bj, 3.28.Mw

Введение

В настоящей работе решается задача исследования структуры фронтовой области импульсных цилиндрических волн, распространяющихся в атмосфере. Рассматриваются головные волны от летящих в атмосфере сверхзвуковых тел (ГВ) и взрывные волны от цилиндрических зарядов взрывчатых веществ (ВВ). В соответствии с классическим подходом [1], совокупность амплитуды Δp_+ волны, протяжённости Δ_{R+} (длительности $t_{R+} = \Delta_{R+}/D_+$, D_+ – скорость вступления волны) её фронтовой области и крутизны профиля давления $\Delta p(t)$ в ней объединены общим понятием «структура» фронта волны. Задача решается посредством сопоставления опытных значений амплитудно-временных параметров ГВ, ВВ (отмеченных соответствующими символами Δp_+, Δp_-, t_+, t_-, t_{R+}, t_{R-} на рис. 1) и опытных профилей избыточного давления $\Delta p(t)$ во фронтовой области ГВ, ВВ с результатами численных и аналитических расчётов.

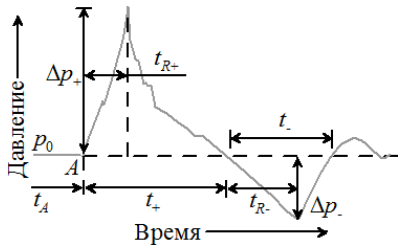


Рис. 1. Типичная эпюра избыточного давления в импульсной цилиндрической волне, [2]

В основу решения задачи положена гипотеза [3], согласно которой летящее со сверхзвуковой скоростью тело формирует цилиндрическую ГВ так же, как и детонирующий шнур формирует цилиндрическую ВВ, разница лишь в скорости V движения источника возмущений. Гипотеза предполагает, что в плоскостях, перпендикулярных направлению движения источника и отстоящих друг от друга на некоторое расстояние ΔL, развитие ГВ или ВВ будет подобным, но смещённым на величину времени $\Delta L/V$.

Многочисленные опытные данные свидетельствуют, что эпюры избыточного давления $\Delta p(t)$ у импульсных цилиндрических волн, распространяющихся в атмосфере, имеют расширенную фронтовую область (рис. 1), то есть не носят ударноволнового характера. Теоретические же решения [1] прогнозируют для этих эпюр ширину фронтовой области в $10^2 \ldots 10^5$ раз меньше зарегистрированных значений Δ_{R+}.

Для примера, на рис. 2, *а* приведены эпюры ГВ от летящего самолёта. Регистрация волны осуществлялась на земной поверхности на расстоянии $R \approx 12560$ м от траектории полёта самолёта, [4]. Видно, что фронтовая область ГВ имеет ширину $\Delta_{R+} \approx 3{,}1 \ldots 5{,}4$ м, где давление нарастает до амплитуды Δp_+ за время $t_{R+} \approx 9{,}11 \ldots 15{,}89$ мс. Графики на рис. 2, *б* представляют ГВ, зарегистрированные на удалении $R \approx 78$ м от траектории полёта пуль при

выстреле из винтовки СВД, [5]. Здесь время нарастания давления до максимума Δp_+ в акустических импульсах составляет соответственно $t_{R+} \approx 37…53$ и $53… 178$ мкс, а ширина их фронтовой области имеет значения $\Delta_{R+} \approx 1{,}3…1{,}8$ и $1{,}8…6{,}1$ см.

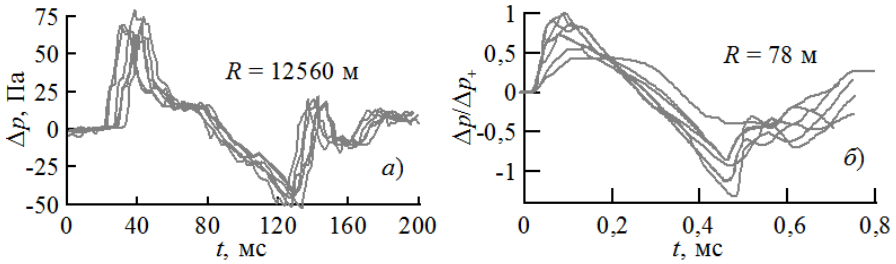


Рис. 2. ГВ от летящих самолёта, [4], и пули, [5]

Структура фронта волны

Выбор гипотезы о протяжённом источнике импульсных цилиндрических волн позволяет при решении поставленной задачи анализировать опытные данные по амплитудно-временным параметрам ВВ и ГВ в приведённых к энергии протяженного источника цилиндрических координатах $\Psi/Q_l^{1/2}$, где Ψ – параметр волны или расстояние R от оси протяженного источника до точки регистрации, Q_l – погонная масса эквивалентного цилиндрического заряда тротила, *кг ТНТ/м*. На рис. 3 символами (1) обозначены опытные данные по параметрам ГВ, а символами (2) и (3) – опытные данные для ВВ, [6].

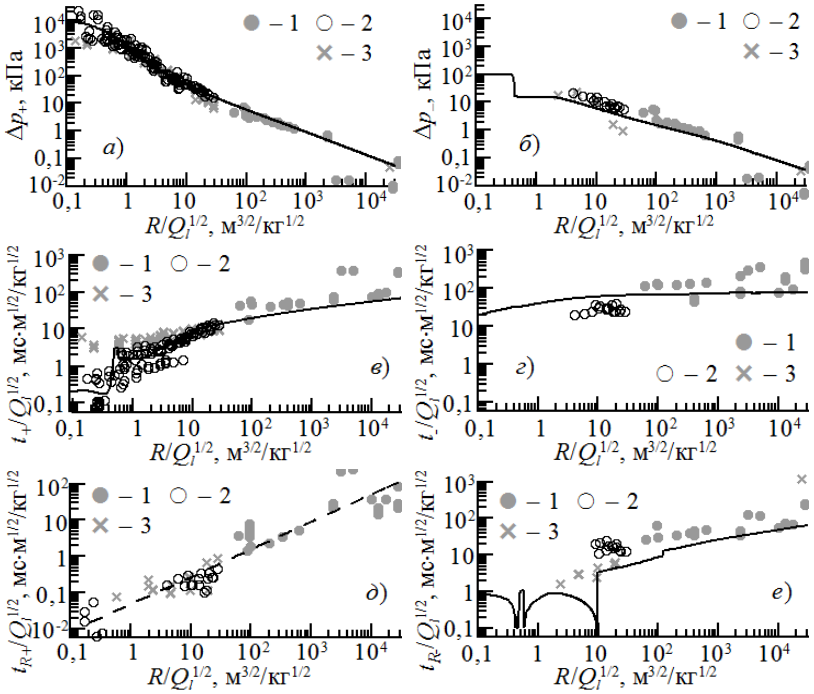


Рис. 3. Амплитудно-временные параметры цилиндрически расходящихся волн, [6]: 1 – ГВ, 2 – взрыв конденсированного химического взрывчатого вещества; 3 – газовый взрыв

Фактически при исследовании структуры фронтовой области импульсной цилиндрической волны использована ещё одна гипотеза о независимости параметров волновых возмущений в воздухе от природы источника, [7]. То есть, по мере удаления от

источника (будь то взрыв, летящее со сверхзвуковой скоростью тело, либо любое другое импульсное выделение энергии со значительной объёмной плотностью) цилиндрическое волновое возмущение становится самостоятельным физическим процессом, а его параметры определяются лишь количеством выделившейся энергии Q_l и расстоянием $R/Q_l^{1/2}$.

Опытные данные на рис. 3 сопоставляются с результатами численного моделирования распространения цилиндрически расходящейся ВВ в однородном воздухе, [6]. Результаты расчетов обозначены графиками (—). Они получены посредством интегрирования уравнений Эйлера в приближении мгновенной детонации заряда тротила погонной массой Q_l = 1 кг/м. Величина Q_l для ГВ подбиралась по критерию наилучшего согласия опытных данных по Δp_+ с графиком (—) для Δp_+ (рис. 3, *а*). В целом, данные на рис. 3 подтверждают обоснованность использования гипотез о протяжённом источнике ГВ и независимости параметров цилиндрически расходящихся волновых возмущений в воздухе от природы источника.

На рис. 3, *д* отсутствуют результаты расчётов для параметра t_{R+}, поскольку уравнения Эйлера не описывают расширение фронтовой области импульсных нелинейных волновых возмущений, так как они воспроизводят эффект опрокидывания волны любой конечной амплитуды по Риману. Опытные данные рис. 3, *д* показывают, что изменение с приведенным расстоянием $R/Q_l^{1/3}$ приведенного времени $t_{R+}/Q_l^{1/3}$ нарастания давления до максимума Δp_+ в цилиндрической волне подчиняется закону энергетического подобия

$$t_{R+}/Q_l^{1/2} = 0{,}05\cdot(R/Q_l^{1/2})^{3/4}, \quad \text{мс}\cdot(\text{м/кг})^{1/2}, \tag{1}$$

отмеченному на рисунке графиком (– – –). Этот закон можно сформулировать и иначе:

$$\Delta_{R+}/Q_l^{1/2} = t_{R+}\cdot D_+/Q_l^{1/2} = 5\cdot10^{-5}\cdot D_+\cdot(R/Q_l^{1/2})^{3/4}, \quad \text{м}^{3/2}/\text{кг}^{1/2}. \tag{2}$$

Формулы (1) и (2) обладают не только новизной, но и универсальностью, так как не зависят от природы источника.

Демонстрируемое на рис. 3 энергетическое подобие амплитудно-временных параметров импульсной цилиндрической волны позволило предположить, что профиль давления $\Delta p(t)$ во фронтовой области ГВ подобен профилю давления $\Delta p(t)$ во фронтовой области ВВ. То есть, не только ширина фронтовой области Δ_{R+} (или t_{R+}) ГВ, но и изменение в ней избыточного давления должно быть аналогичным ВВ. В [8] получена функция

$$\Delta p(t) \approx \Delta p_+[1-\exp(-\lambda_*\cdot t)], \tag{3}$$

удовлетворительно описывающая изменение избыточного давления $\Delta p(t)$ во фронтовой области расходящейся (т.е. не плоской) ВВ. Здесь λ_* – параметр, представляющий долю от длительности t_{R+}.

Для примера, на рис. 4, *а* показана аппроксимация (---) зависимостью (3) эпюры избыточного давления (—) во фронтовой области интенсивной цилиндрической ВВ. На

рис. 4, *б* аналогичным образом демонстрируются аппроксимации эпюр $\Delta p(t)$ слабых ГВ, ранее показанных на рис. 2, *б*.

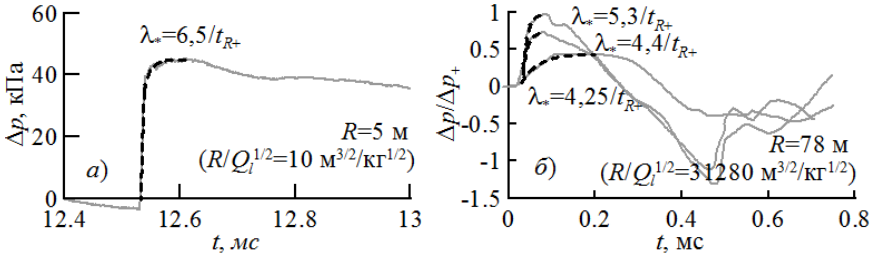


Рис. 4. Аппроксимация профилей избыточного давления во фронте волны

Регистограмма на рис. 4, *а* была получена авторами при экспериментальном исследовании расширения фронтовой области цилиндрических ВВ в приземном слое атмосферы. Цилиндрическая ВВ создавалась подрывом пучка детонирующих шнуров. Погонная масса эквивалентного цилиндрического заряда ТНТ составила $Q_l \approx 0{,}25$ кг/м. И детонирующие шнуры, и датчики давления типа PCB M137A23 размещались на песчаной поверхности. На рис. 5 представлены экспериментальные записи $\Delta p(t)$ цилиндрической ВВ. Датчики давления помещались на одной линии перпендикулярно протяженному заряду, на заданных дальностях R от его центра. Соответственно, график на рис. 4, *а* демонстрирует фронтовую часть правой записи $\Delta p(t)$ на рис. 5. Амплитудно-временные параметры представленных на рис. 5 ВВ также приведены на рис. 3.

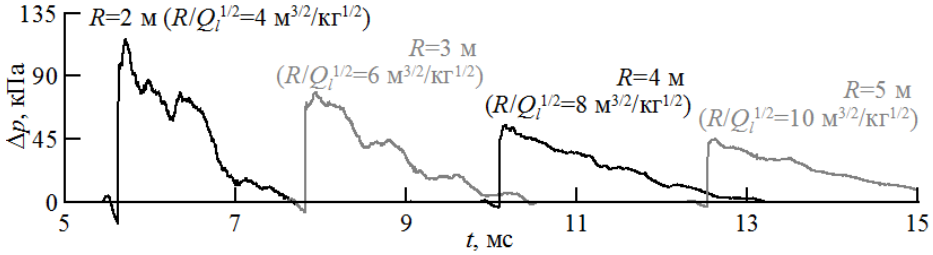


Рис. 5. Профили избыточного давления в цилиндрической ВВ

Записи $\Delta p(t)$ на рис. 4 показывают, что функцией (3) удаётся удовлетворительно аппроксимировать профили избыточного давления во фронтовой области импульсной цилиндрической волны в широком диапазоне приведенных расстояний до протяжённого источника – $R/Q_l^{1/2} = 4\ldots31280$ м$^{3/2}$/кг$^{1/2}$. Это позволяет предположить, что и на более близких расстояниях до источника (фактически при $R/Q_l^{1/2} \to 0$) фронтовая область цилиндрической волны можно описать функцией (3).

Заключение

Таким образом, результаты настоящей работы и их научная новизна заключаются в выявлении ранее неизвестного закона энергетического подобия расширения фронтовой области нелинейных волновых возмущений, распространяющихся в атмосфере цилиндрически симметрично. Этот закон демонстрируется на рис. 3, *д* и формализован

соотношениями (1), (2). Новизной также обладает предложение описывать профиль избыточного давления $\Delta p(t)$ во фронте цилиндрической волны (к такому типу нелинейных волн относится и ГВ) соотношением (3).

Формулы (1) – (3) будут полезными при решении задач акустической экологии, [9]. Например, при оценке вредного воздействия на окружающую среду и живые организмы со стороны ГВ, возникающей при сверхзвуковом полёте в атмосфере различных тел. Кроме того, практическая значимость формул (1) и (2) состоит в возможности их использования для оценки достоверности соответствующих математических моделей нелинейных волновых возмущений и дальнейшего совершенствования этих моделей.

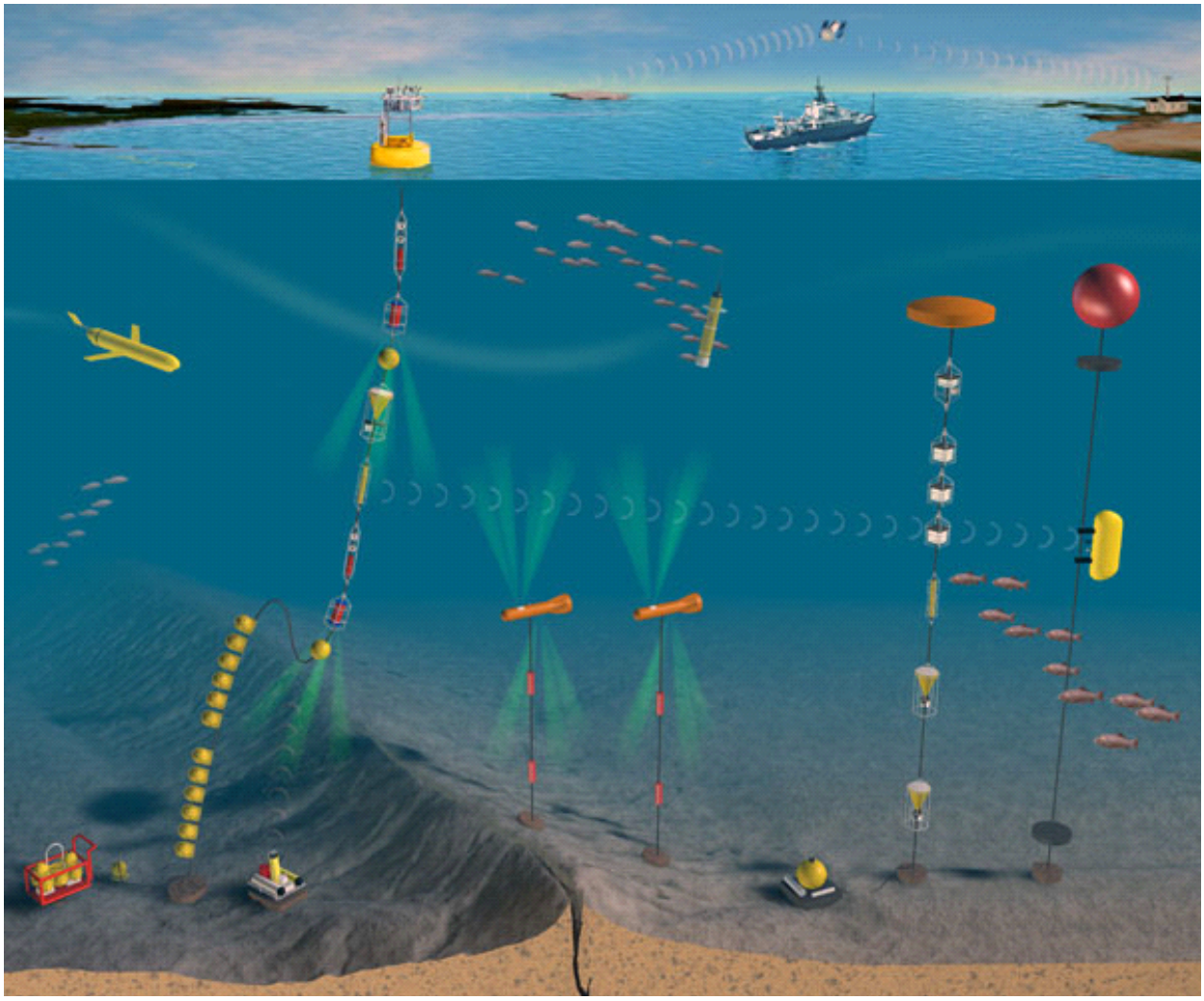
Данная работа выполнена при частичной финансовой поддержке Минобрнауки, госзадания 125020501402-0 (раздел 3) и 17.1. (раздел 2) А также при поддержке проекта РНФ 25-17-00060 (раздел 1).

Список литературы

1. *Арутюнян Г.М*. Термодинамическая теория гетерогенных систем. М., Физматлит, 1994. 272 с.
2. *Адушкин В.В., Рыбнов Ю.С., Спивак А.А*. Инфразвук в атмосфере. М., ТОРУС ПРЕСС, 2020. 332 с.
3. *Цикулин М.А.* Воздушная ударная волна при взрыве цилиндрического заряда большой длины. // Прикладная механика и техническая физика, 1960. № 3, С. 188.
4. Sonic Boom, Weather Wing [6th], 6WWP 105-1-1 , AD479366, Washington, DC, USA, Feb. 1966. 46 p.
5. *Орешков О.В*. Научно-техническое обоснование создания и действия комплексов акустической разведки, предназначенных для защиты от огня стрелкового оружия. Дис. … канд. тех. наук: 20.02.14. Саров, 2006. 195 л.
6. *Косяков С.И., Куличков С.Н. Чунчузов И.П*. Влияние устойчивости пограничного слоя атмосферы на параметры распространяющихся в нем акустических волн. // Акуст. журн. 2019. Т. 65. № 4. С. 508.
7. Физика взрыва / Под ред. Л.П. Орленко. - 3-е изд., перераб. - В 2 т. Т. 1. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. 832 с.
8. *Kosyakov S.I.* Structure of the blast wave front // Transient Combustion and Detonation Phenomena. Fundamentals and Applications. Edited by G.D. Roy and S.M. Frolov. Moscow, 2014. P. 223.
9. *Руденко О.В., Маков Ю.Н*. Звуковой удар: от физики нелинейных волн до акустической экологии (обзор) // Акуст. журн. 2021. Т. 67. № 1. С. 3.

Назад к содержанию секции

КРУГЛЫЙ СТОЛ ПРИКЛАДНАЯ АКУСТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ



назад к Содержанию

СОДЕРЖАНИЕ СЕКЦИИ КРУГЛЫЙ СТОЛ ПРИКЛАДНАЯ АКУСТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ

ВАРИАНТЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ ОСВЕЩЕНИЯ ПОДВОДНОЙ ОБСТАНОВКИ В ПРИБРЕЖНЫХ МЕЛКОВОДНЫХ РАЙОНАХ РФ
Машошин А.И. 1606

СИСТЕМОТЕХНИЧЕСКИЕ И ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ СОЗДАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ ПОДВОДНОГО НАБЛЮДЕНИЯ
Коваленко В.В.....1608

УДК 534 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39480

Варианты построения системы освещения подводной обстановки в прибрежных мелководных районах РФ

Машошин А.И.
АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», г.Санкт-Петербург
Тел.:+79217632345; Факс: +78122323376; E-mail: aimashoshin@mail.ru

В докладе приведены требования к перспективным системам освещения подводной обстановки (СОПО), обоснованные по итогам выполнения МЦП «Гидроакустика-2020». Согласно этим требованиям СОПО должны:

– функционировать в активно-пассивном режиме, что обеспечит обнаружение как малошумных (ПЛ, СМПЛ, АНПА), так и сильно шумящих (НК, БЭК) объектов;

– иметь распределённую структуру, что обеспечит высокую боевую устойчивость и ремонтопригодность;

– эффективно функционировать в условиях активного противодействия со стороны противника;

– быть масштабируемой;

– обслуживаться штатными силами и средствами ВМФ.

В докладе описываются 3 варианта СОПО для мелководных прибрежных районов РФ, технология изготовления которых освоена в АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»:

1) Активно-пассивный комплекс распределённых радиогидроакустических станций подводного наблюдения, предназначенный для обнаружения малошумных и сильно шумящих объектов. Комплекс может формировать как рубежную, так и зональную СОПО. При установке в прибрежной области питание комплекса и обмен данными осуществляется по подводному кабелю. При установке в удалённых районах используется автономное питание, обмен данными осуществляется по радио (спутниковому) каналу связи.

2) Пассивный рубежный комплекс подводного наблюдения в районах базирования сил ВМФ на основе донных линейных волоконно-оптических антенн, предназначенный для обнаружения малошумных и сильно шумящих подводных и надводных объектов. Антенны в несколько параллельных рядов перегораживают вход в базу и соединяются с командным пунктом на берегу волоконно-оптическим кабелем.

3) Пассивный комплекс распределённых волоконно-оптических средств подводного наблюдения, предназначенный для обнаружения малошумных и сильно шумящих объектов. Комплекс состоит из отдельных гидроакустических датчиков, сформированных из нескольких

волоконно-оптических приёмников. Каждый датчик соединён с аппаратурой генерации и обработки оптических сигналов на командным пункте волоконно-оптическим кабелем. Путём соответствующей расстановки датчиков формируется рубежная либо зональная СОПО.

Ключевые слова: гидроакустика, система освещения подводной обстановки, активно-пассивный режим, функционирование в условиях активного противодействия.

УДК: 608, 534.8, 623.9 DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39494

Системотехнические и физические принципы создания современных систем подводного наблюдения

В.В. Коваленко

Институт океанологии РАН им. П.П. Ширшова. 117997, Москва, Нахимовский пр., д. 36

E-mail: hydrophys@mail.ru

Аннотация: Рассмотрены основные принципы построения систем подводного наблюдения, приходящие на смену существовавшим до недавнего времени взглядам и методам в связи с появлением новых обстоятельств и факторов, новой техники и новых технологий. Среди новых факторов констатируется существенное снижение акустической заметности традиционных объектов подводного наблюдения и появление множественности современных малозаметных объектов при групповом их использовании. Характеризуются недостатки традиционных подходов к созданию систем подводного наблюдения и обосновывается необходимость создания распределенных систем на основе сетевых принципов. Обсуждается зависимость свойств распределенных систем подводного наблюдения от условий распространения звука в море и обосновывается целесообразность объединения принципов создания сетевых систем и систем оперативной океанографии.

Ключевые слова: пространственно-распределенные системы, много-модальные системы, оперативная океанография.

Systemic and physical principles of creating modern underwater surveillance systems

V.V. Kovalenko

P.P. Shirshov Institute of oceanology 117997, Russia.

E-mail: hydrophys@mail.ru

Abstract: The article discusses the basic principles of building underwater surveillance systems, which have replaced the previous views and methods due to the emergence of new circumstances and factors, as well as new equipment and technologies. Among the new factors, there is a significant decrease in the acoustic visibility of traditional underwater surveillance objects and the emergence of multiple modern stealthy objects when they are used in groups. The article highlights the disadvantages of traditional approaches to building underwater surveillance systems and argues

for the need to create distributed systems based on network principles. The paper discusses the dependence of the properties of distributed underwater surveillance systems on the conditions of sound propagation in the sea and substantiates the expediency of combining the principles of creating network systems and operational oceanography systems.

Keywords: spatially distributed systems, multi-modal systems, operational oceanography

Введение

Наблюдаемое в настоящее время стремительное развитие наук и технологий закономерно коснулось подводного наблюдения и, в частности, гидроакустики. Помимо эволюционных изменений, связанных с ростом возможностей вычислительной техники, антенн, средств связи, управления и с лучшим пониманием распространения звука в море, изменился также ряд существенных для подводного наблюдения факторов. К ним можно отнести изменение свойств самих объектов наблюдения, усиление значимости влияния условий окружающей океанической среды и изменение тактических ситуаций.

К приоритетным, как правило, относят движущиеся подводные объекты. Успехи кораблестроения и приборостроения привели к тому, что свойства этих объектов за последние десятилетия заметно изменились. За это время ими были приобретены:

- существенно меньшая шумность и, в целом, меньшая заметность, включающая низкие уровни демаскирующих акустических полей;
- увеличенная продолжительность нахождения в подводном положении;
- улучшенный потенциал систем гидроакустического наблюдения.

Важно отметить заметное смещение активности операций против подводных объектов в прибрежные районы океана, характеризующиеся сложными условиями распространения звука. Эти условия, являются следствием:

- сильной пространственно-временной изменчивости океанологических характеристик и, прежде всего, распределения скорости звука в водном слое и дне;
- увеличивающимися уровнями подводного шума в связи с техногенными причинами.

В настоящее время очевидно изменение характера конфликтов во всех средах, включая морскую среду. Начало этих изменений отнесено к концу предыдущего столетия и описано в работах по распределенным сетевым операциям и системам [1,2]. Следствием этих обстоятельств явилось изменение представлений о характерных для настоящего времени тактических ситуациях. Примечательно приведенное в работе [3] утверждение: «Новые геополитические реалии и динамика ведения подводной войны сделали классический подход к ней, безусловно, устаревшим, если не сказать архаичным». На смену, так называемому платформо-центричному подходу, основывающемуся на использовании

локальных обитаемых корабельных платформ пришли представления о распределенном, сетевом характере использования роботизированных сил и средств.

1 Пространственная организация современных систем подводного наблюдения

Несмотря на усилия по улучшению потенциала пассивных гидроакустических средств из-за уменьшения заметности приоритетных целей произошло существенное снижение дальностей обнаружения этих целей. По существу, дальности обнаружения акустическими и неакустическими системами стали выражаться показателями одного порядка. Реакцией на этот факт первоначально стала ориентация на развитие низкочастотной гидролокации с расчетом на большие дальности обнаружения подводных объектов [4]. Однако, неполных десяти лет хватило, чтобы к этому направлению развития гидроакустики разработчики систем подошли с большей осторожностью [5,6]. В мелком море ожидаемые дальности не достигались и происходила перегрузка приемных трактов большим потоком ложных контактов [5]. В глубоком море на тех дальностях обнаружения, к которым стремились как к желаемому результату, образовывались большие по площади зоны неопределенности, что требовало затратных до-поисковых усилий [5]. В этот же период времени рассматривались схемы излучения низкочастотного зондирующего сигнала и его приема в пространственно-отстоящих от излучателя точках. Эта схема, называемая бистатической или мульти-статической [7], очевидно имела различные варианты организации наблюдения. Сохранившиеся претензии на большие дальности обнаружения из одной или нескольких близко расположенных позиций наблюдения в расчете на использование мощного низкочастотного зондирующего сигнала, по существу, не слишком отличались от первоначального подхода к моно-статической системе дальней гидролокации [4, 7]. Отметим здесь главное. Попытки получить большие дальности из одной точки неизбежно сталкиваются с указанными ограничениями [5]. Усилим сказанное. «В рамках традиционных платформо-центрических подходов использование моностатической гидролокации, приводит к дорогостоящим решениям, не соответствующим современной структуре сил и не обеспечивающим засветку всей водной толщи заданной акватории» [8]. Отметим, однако, что одним из основополагающих принципов современной гидроакустики признано пространственное распределение её элементов. В явной форме к таким принципам отнесены два крупных свойства. Первое – распределенная структура наблюдателя. Второе - оптимальное использование свойств акустических полей в пространственной, временной и частотной областях. Очевидно, справедливо считать, что энергетика акустического поля, генерируемого или рассеиваемого объектом-целью, распределена по пространству, по частоте и изменяется во времени. Отсюда следует рекомендация по желательным

особенностям обнаружителя. В общем случае систему предлагается строить в виде многоячеистой конструкции в виде развертываемых, распределенных по пространству излучателей и приемных антенн, включая их глубину. При этом, в рамках отдельных ячеек стремления к большому покрытию нет. Это подлежащая оптимизации характеристика. Многопозиционная система представляется множеством распределенных маломощных излучателей и приемников и такая конструкция считается предпочтительной в том числе в сложных условиях распространения звука. При таком построении, собирающем (интегрирующем) сигнал по пространству, времени и по частоте, могут быть обеспечены необходимо большие зоны покрытия, высокая вероятность обнаружения подводных объектов и надежность сопровождения целей. Указанное интегрирование осуществляется путем специализированной для систем указанной конструкции обработки данных. Важно отметить, что для оптимизации элементов мульти-статической системы в пространстве используется знание 3D распределения скорости звука в этом пространстве. Эта оптимизация ведется по критерию заданной эффективности всей системы и включает в себя ликвидацию или минимизацию недопустимых «брешей» в освещаемых системой областях, в том числе по глубине. Для оптимальной реконфигурации элементов системы во времени используется знание характеристики временной изменчивости поля скорости звука, т.е. изменчивости структуры «засветки» неоднородного пространства. А для оптимизации частотной избирательности необходимо знать спектральные свойства сигнала (прямого и рассеянного искомым объектом).

2 Объединение текущего оценивания свойств океанической среды и подводного наблюдения в единую конструкцию как современный принцип

Данный раздел начнем с утверждения о том, что подводное наблюдение и оперативная океанография не являются, в рамках конечных задач, разными, независимыми объектами (рис.1). И природные явления, сформированные океаническими средами, и возмущения, спровоцированные движущимися подводными объектами, образуют общую смешанную картину тех полей физических характеристик, которые регистрируются сенсорами. Очевидно, возникает задача учета свойств и/или разделения фоновых (помеховых) и сигнальных эффектов. В условиях слабого сигнала или низких отношений сигнал/помеха без привлечения внешней системы, описывающей природную составляющую суммарного эффекта не обойтись. Такая система – это система оперативной океанографии, разрешающая природные эффекты с масштабами и временной изменчивостью, характерной для сигнальных эффектов.

Обратимся к рисунку 1. Относящиеся к его верхней части блоки, характеризуют измерительные элементы океанологической составляющей общей системы. Эта часть состоит из средств и данных измерений характеристик океанической среды – средств и данных дистанционного зондирования среды (средний верхний блок) и средств и данных контактных измерений (левый верхний блок).



Рис. 1. Составные части единого целого: наблюдение за подводной обстановкой – оперативная океанография.

Данные дистанционного зондирования обычно представляются как продукт, получаемый от активных и пассивных средств космического базирования. К средствам активного зондирования относят радиолокационную альтиметрию, радиолокацию бокового обзора (SAR) и инверсную радиолокацию бокового обзора (ISAR). К средствам пассивного зондирования относят средства микроволновой многочастотной радиометрии и некогерентной оптики. В условиях прибрежных зон океана, окраинных и шельфовых морей, характеризующихся сильной пространственной и временной изменчивостью гидрофизических свойств, становится практически необходимым использование береговой коротковолновой настильной радиолокации поверхности акваторий. Эта радиолокация, обеспечивающая съем данных о поверхностных течениях и волнении моря, также отнесена к блоку дистанционного зондирования океанической среды. Отметим, что и акустические

средства, образующие системы акустической томографии океана, должны быть отнесены к этому же блоку дистанционного зондирования. Данные контактных измерений in-situ обычно получаются от позиционных и от мобильных измерителей. К позиционным контактным измерителям относятся заякоренные (стационарные) или дрейфующие станции и буи – носители средств измерений физических переменных, характеризующих океаническую среду. В работах, которые образуют фундамент оперативной океанографии, отчетливо выделяется понятие «существенных, характеризующих океан, переменных» (Essential Ocean Variables – EOV). К этим переменным отнесены температура, плотность, соленость (CTD) и скорости перемещения частиц.

К контактным мобильным измерителям in-situ отнесены те, которые размещаются в виде полезной нагрузки на автономных роботизированных носителях или аппаратах. Отметим особый вид автономных аппаратов – аппаратов – планеров (глайдеров), способных осуществлять профилирование свойств океанической среды по глубине. И данные дистанционного зондирования, и данные in-situ от контактных позиционных и мобильных измерителей связаны с информацией о «существенных, характеризующих океан, переменных» (EOV). Кроме динамических данных, должны учитываться данные о свойствах океанического дна (батиметрии и составе грунтов) и береговой черте. Правый верхний блок содержит базы информативных данных о стационарных свойствах дна.

Для описания океана и его отдельных районов требуются модели, поскольку покрыть все акватории измерениями практически невозможно. Информация об изменчивости океанической среды содержится в моделях, являющихся интерполяторами и экстраполяторами данных. Блок, соответствующий моделям, помещен на рисунке 1 в центральной его части. Поскольку состояние океанической среды связано с атмосферными явлениями моделирование осуществляется по отношению к системе «океан – атмосфера» либо учитывается влияние атмосферных явлений на океанические явления в виде специфического воздействия (форсинга). Блок атмосферного форсинга показан на рисунке 1 справа от блока моделей. Объединение наблюдений и описывающих процессы в океане моделей осуществляется путем использования инструментария ассимиляции данных в моделях. На рисунке 1 блок ассимиляции показан совмещенным с блоком моделирования. На выходе этого совмещенного блока получаются оценки состояния и изменчивости океанической среды. Разумеется, как и все оценки, эти оценки характеризуются точностью или неопределенностью, которые для практических задач должны быть определены. Знание указанных оценок – это и есть знание среды, которое учитывается при решении задач подводного наблюдения. Получение такого знания должно осуществляться в темпе изменчивости состояния среды. Превращенный для практического использования, набор

оценок состояния и изменчивости океанической среды, включающий оценки неопределенности, представлен на рисунке 1 отдельным блоком «анализ и предсказание окружающих условий». Анализ – текущие оценки, предсказание – краткосрочный прогноз.

Очевидно, что для подводного наблюдения необходимо знание (описание) искомых объектов с особенностями тех физических и иных полей, которые эти объекты демаскируют. Знание среды, наложенное на описание объектов, подлежащих наблюдению, позволяет получить те описания возмущений среды объектами, которые воспринимаются наблюдателем (акустическим, гидрофизическим). Эти, воспринимаемые наблюдателем оценки сигнала совместно с влиянием среды составляют содержимое показанного на рисунке 1 блока «анализ и предсказание в отношении объекта наблюдения». Блок «физические поля, другие информационно-содержательные поля» включает комплекс демаскирующих объект полей. Это один из современных принципов построения эффективных систем подводного наблюдения, называемый много-модальностью. Последние два блока, расположенные в нижней части рисунка 1, иллюстрируют две взаимосвязанные функции. Справа представлен блок с описанием наблюдателя, задачей которого является обнаружение, классификация и локализация подводного объекта. Слева – блок, ответственный за качество используемой системой океанологической информации путем адаптивной выборки, т.е. ответственный за решение о дополнительных измерительных ресурсах. В заключение обратим внимание на роль знания океанической среды. Это уже не часть гидрометеорологического обеспечения (ГМО) системы подводного наблюдения, а необходимый функциональный элемент целостной системы

3 Распределенное подводное наблюдение с океанологической поддержкой

На рисунке 2 приведена функциональная схема акустической системы подводного наблюдения, построенной в соответствии с современными принципами. К этим принципам отнесены распределенный характер сенсорного поля и адаптивность расположения сенсорных элементов, а также адаптивность процедур обнаружения, классификации и локализации цели к условиям распространения звука. Функциональная схема состоит из последовательно связанных операций, названных стадиями. На начальной стадии, (0), производится текущая оценка состояния среды и кратковременный прогноз состояния «существенных, характеризующих океан, переменных» (EOV). На этой стадии задействуется ранее описанный инструментарий оценивания состояния океана, а именно, наблюдения с особой ролью подводных аппаратов и систем дистанционного зондирования, моделирование и ассимиляция данных измерений в моделях. Функционирование блока текущего оценивания и прогноза подвергается воздействию обратных связей от последующих блоков цельной

системы подводного наблюдения. Смысл этих обратных связей в точности тот же, который представлен на рисунке 1. Содержание стадии 1 заключается в оптимизации пространственной 3D расстановки сенсорных элементов наблюдательного поля. Аналогичной оптимизации подлежат также парциальные излучатели общей системы. Элементами пассивной акустической системы обычно являются антенные решетки, в том числе, решетки векторно-скалярных приемников.



Рис. 2. Содержание распределенного подводного наблюдения, основанного на преимущественном применении морской робототехники в сетевых системах с океанологической поддержкой.

В состав использующегося на этой стадии инструментария входят алгоритмы, эксплуатирующие знание состояния окружающей океанической среды и модели распространения звука. На следующей стадии (2) применяются улучшенные алгоритмы обработки сигналов, эффективные оптимизационные алгоритмы и решаются задачи обнаружения, классификации и локализации подводных целей. При изменении условий распространения звука сенсорное поле может реконфигурироваться. Управление такой реконфигурацией осуществляется специализированным процессором.

Заключение

Характерное для настоящего времени изменение свойств и способов применения морских подвижных объектов, такое, как уменьшение их заметности, автономность и групповое использование, привели к необходимости учета этих обстоятельств при создании систем подводного наблюдения. Ответом на указанные обстоятельства стало использование при создании таких систем ряда принципов, которые условно могут быть разделены на системотехнические и физические. К системотехническим принципам здесь отнесены уменьшение значимости локального наблюдателя (и пассивного, и активного) и переход к созданию распределенных систем наблюдения, а также комплексное использование полей различной физической природы (много-модальность) и переход к автономным роботизированным носителям. К физическим принципам отнесены оптимизация и адаптивность расстановки сенсорных элементов в пространстве к условиям окружающей океанической среды и согласованная с условиями среды обработка. К объединяющим эти категории принципам в части гидроакустики можно отнести уменьшение значимости озвучивания пространства локальным мощным низкочастотным излучателем и размен «излучателей локальной мощности» на множество распределенных, парциальных маломощных излучателей, положение которых оптимизируется с учетом неоднородностей океанической среды.

Список литературы

1. *Cebrowski A. K., Garstka J. J.* “Network-Centric Warfare: Its Origin and Future // Naval Institute Proceedings, 1998
2. *Alberts D. S., Garstka J. J., Stein F. P.* Networked Centric Warfare: Developing and Leveraging Information Superiority. CCRP Publications Series, 1999
3. *Srivastava C.P., Anderson M.* The Emerging ASW Calculus – Pervasive, Persistent and Precise.// Matters Military 2016 December 29
4. *Tyler G.D.* The Emergence of Low-frequency Active acoustics as critical antisubmarine warfare technology // J. Hopkins APL Tech. Digest, V. 13, N 1b, 1992
5. *Shepherd I.* “Low frequency active sonar a user’s perspective” // UDT 1995, P. 138-141
6. *Tyler G.D.* Responding to a Dynamic Environment // J. Hopkins. APL Technical Digest, V. 23. N4, 2002.
7. An Unofficial History of The Surveillance Towed Array Sensor System (SURTASS) 1972-2015 // iusscaa.org›articles/surtass_history.pdf
8. Pervasive Sound Inherently scalable, the ISS scribd.com>document/413128952/Janes-Profile 2015.

назад к Содержанию секции

назад к Содержанию

Научное издание

Сборник трудов

IV Всероссийской акустической конференции, совмещенной с XXXVIII сессией Российского научно-технического акустического общества

Подписано к печати 29.05.2026
Формат 62x94 1/8, уч.-изд.203.1 п.л. Тираж 360 экз.
ООО «Издательство «ГЕОС»

125315 Москва, 1-й Амбулатоный пр. 7/3-114
Тел.: +7 (495) 959 3516, +7 (926)222 3091
e-mail: geos-book@yandex.ru
сайт: www.geos-book.ru

Отпечатано с готового оригинал-макета, подготовленного в НТ РАО
Составитель – Е.Д. Баженова, отв. редактор – Е.В. Юдина
126292 Москва. ул. Шверника, д.4
Тел.: +7 (499) 126-0100, e-mail: ras@akin.ru

Труды изданы без дополнительного редактирования по оригиналам докладов, представленных авторами. Оргкомитет не несет ответственности за стиль и форму изложения представленных материалов