

ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф.-м.н. Рыбьянца Андрея Николаевича
о диссертационной работе Асфандиярова Шамиля Альбертовича
«Использование двумерных антенных решёток для ультразвуковой
визуализации и физического воздействия на объекты в неоднородной
среде», представленной на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук по специальности 1.3.7. Акустика

Диссертационная работа Ш.А. Асфандиярова посвящена разработке и исследованию новых методов ультразвуковой (УЗ) визуализации и физического воздействия на объекты в неоднородных средах с использованием двумерных антенных решеток. Двумерные УЗ антенные решетки используются во многих приложениях ультразвука, в частности в медицине для трехмерных УЗ диагностики и терапии. Помимо медицинских приложений, активно развиваются направления, использующие УЗ антенные решетки в воздухе, например, в качестве узконаправленных громкоговорителей (параметрических излучателей) или для задач акустической манипуляции и удержания объектов (акустическая левитация). Интерес к использованию двумерных антенных решеток обусловлен возможностью гибкого управления пространственно-временной структурой излучаемого акустического поля и обработки принимаемого излучения.

Научная новизна диссертационной работы заключается в разработке нового метода ультразвуковой транскраниальной визуализации структур головного мозга, основанный на акустической профилометрии костей черепа. исследовании влияния сдвиговых волн на формирование вторичного фокуса в транскраниальной терапии и разработку 128-элементной решетки, генерирующей в воздухе ударные волны с давлением свыше 175 дБ.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования полученных результатов в медицинских приложениях (диагностика сосудов мозга, эластометрия мышц) и инженерных решениях (акустические пинцеты, устройства пеногашения и др.).

Диссертация состоит из введения, трех оригинальных глав, заключения и библиографии. Общий объем работы составляет 134 страницы, 60 рисунков и 127 библиографических ссылок.

Введение диссертации содержит аргументацию актуальности исследования, анализ научной новизны и прикладной ценности изучаемой проблемы. Приведен обзор последних достижений в области диссертационного исследования, сформулированы целевые установки и исследовательские задачи. Приведено краткое содержание диссертации по главам.

Первая глава посвящена рассмотрению вопросов УЗ визуализации головного мозга через неповрежденный череп. Отмечены основные препятствия УЗ визуализации — вариативность толщины кости, резкий контраст скорости звука между костной и мягкой тканями, а также затухание волн в черепе, вызывающие искажения и рефракцию. Для минимизации этих эффектов предложено применение двумерных антенных решеток, регулирующих фазу излучаемых сигналов. Хотя расчет фазовых задержек возможен на основе данных компьютерной томографии (КТ), автор акцентирует внимание на методах, в которых толщинный профиль и визуализация выполняются исключительно УЗ технологиями. Рассмотрены два подхода к оценке толщины черепа. Первый подход, основанный на поэлементном сканировании в А-режиме, при котором элементы решетки поочередно излучают импульсы, а толщина вычисляется по задержкам отражений, демонстрирует низкую точность при малой толщине объекта. Второй подход,

использующий формирование луча с задержкой и суммированием при фокусированном характере зондирующего пучка, является более эффективным. Эксперименты проводились на фантоме черепа, изготовленном автором. Сетка из 100 точек с шагом 3 мм на поверхности фантома черепа позволила реконструировать профиль, совпадающий с КТ данными. Описан метод визуализации сферических рассеивателей, расположенных за фантомом, с использованием компенсации aberrаций. Коррекция aberrаций при излучении позволила сформировать плоский волновой фронт после прохождения кости, а адаптированный алгоритм при приеме учитывал неоднородность толщинного профиля фантома. Показано, что без компенсации aberrаций изображения рассеивателей искажают их локализацию, тогда как коррекция восстанавливает положение объектов, хотя четкость снижается по сравнению с эталоном.

Вторая глава посвящена исследованию применения сдвиговых волн для транскраниальной диагностики состояния мозга и оценки механических свойств мягких тканей (сдвиговая эластография). Проанализировано прохождение фокусированных УЗ пучков через плоские твердотельные слои. Метод углового спектра позволил рассчитать вклад продольных и сдвиговых волн в формирование акустического поля. Расчеты показали, что при углах фокусировки свыше 30° сдвиговые волны создают вторичный фокус, интенсивность которого зависит от поглощения в слое. Коэффициенты прохождения для обоих типов волн измерены на образцах, имитирующих череп, и хорошо согласуются с теорией. Представлен метод оценки упругости тканей по результатам измерения фазовой скорости сдвиговых волн, возбуждаемых механическим вибратором. Доплеровский анализ отраженных УЗ сигналов выявил сложности в точности измерений на малых глубинах, требующие уточнения модели распространения волн. Последний параграф главы посвящен лазерно-виброметрическим измерениям сдвиговых волн в фантоме. Импульсное и непрерывное воздействие низкочастотного излучателя позволили зафиксировать угловые распределения амплитуды и фазы колебаний. Показано, что частотная зависимость скорости сдвиговых волн хорошо описывается релаксационной моделью.

Третья глава описывает разработку и оптимизацию УЗ антенных решеток для фокусировки высокоинтенсивных ультразвуковых волн в воздухе. Разработана конструкция 128-элементной решетки пьезопреобразователей, расположенных на сферической поверхности (радиус 500 мм) с резьбовыми держателями для точной юстировки и фазировки каждого элемента. Метод акустической голографии позволил определить распределение акустического давления на поверхности решетки, которое показало, что 30% элементов имели сниженную амплитуду из-за расстройки резонансных частот. Тем не менее решетка позволила создавать очень высокие уровни акустического давления в фокусе. Уровни акустического давления, создаваемые решеткой в фокусе, оказались значительно выше, чем верхний предел динамического диапазона большинства измерительных микрофонов. С помощью моделирования нелинейных эффектов распространения акустической волны в программе «HIFU beam» и нестандартных экспериментов по измерению акустического поля в воздухе с помощью гидрофона было показано образование ударных волн в фокусе решетки. В главе также исследована 256-элементная мозаичная решетка с нерегулярным расположением многоугольных элементов. Голографический анализ фазовых отклонений выявил причины асимметрии фокального пятна. Коррекция задержек на основе реконструированных данных позволила выровнять распределение фазы, улучшив симметрию фокальной области и увеличив пиковое давление на 15–20%.

Заключение диссертации содержит сведения об основных результатах работы, благодарности, список публикаций автора по теме диссертации и список литературы.

Диссертационное исследование выполнено на высоком методологическом уровне, результаты подтверждены публикациями в авторитетных научных изданиях и активным участием в профильных конференциях. К ключевым **достоинствам работы** относятся системный подход к изучению темы, четкая логическая структура, глубина анализа физических механизмов акустических явлений, умелое сочетание теоретических расчетов и физических экспериментов, а также способность автора к критической интерпретации результатов и определению перспектив их применения. Текст работы отличается логической стройностью, терминологической точностью и безупречным оформлением, что свидетельствует о высоком качестве научного труда.

Автореферат полностью соответствует тексту диссертационной работы.

При всех достоинствах диссертационная работа не лишена некоторых недостатков:

1. В Главе 2, на с. 39 (1 абзац) автор пишет: «При разработке устройств, предназначенных для транскраниального применения ультразвука в терапии, таких как широкоапертурные фазированные антенные решетки, исследователи поначалу исходили из того, что не только в мягких биотканях и иммерсионной жидкости волны являются чисто продольными, но в костях черепа [39, 40]».

Предложение не закончено.

2. В Главе 2, §2.1 рассмотрены особенности прохождения плоской ультразвуковой волны через упругий плоскопараллельный слой. Приведены математические выкладки, позволяющие определить коэффициент прохождения коротких ультразвуковых импульсов через плоскопараллельный твердотельный слой в виде продольных и сдвиговых волн. Приведены результаты измерений частотных зависимостей фазовой скорости и поглощения сдвиговых и продольных волн для исследуемого образца, изготовленного из материала, имитирующего кости черепа человека. Рассмотрена модельная задача, в которой фокусированная волна, распространяющаяся в жидкости, проходит через толстый плоскопараллельный упругий слой.

Однако череп человека не является плоскопараллельным, причем ранее автор изготовил фантом черепа натуральной формы и описал прохождение через него ультразвуковых волн (Глава 1). Представляется логичным также провести расчеты и измерения распространения фокусированной волны через слой более близкой к натуральной форме.

3. В §3.3 Выводы к Главе 3 на с. 116 автор пишет: «Поскольку подводимая электрическая мощность пропорциональна квадрату амплитуды напряжения, то при максимально возможной амплитуде ($U_0 = 10$ В), согласно Рис. 3.8, мощность достигала значения около 5 Вт. Примечательно, что при максимальных уровнях возбуждения излучателя радиационная сила составляла 2 мН».

Однако, выше по тексту и в подписи к рисунку указано «На Рис. 3.8 представлены результаты измерения частотной зависимости акустической мощности при амплитуде электрического напряжения на элементах излучателя $U_0 = 1$ В. Как видно, максимальное значение достигается на выбранной рабочей частоте 35.5 кГц и составляет примерно 0.045 Вт».

Непонятно проводились ли измерения радиационной силы и акустической мощности при указанном напряжении 10 В или это простая аппроксимация измерений при напряжении 1 В.

Перечисленные выше замечания, часть из которых носит характер пожеланий, не снижают общей положительной оценки диссертационной работы Ш.А. Асфандиярова.

Считаю, что диссертация «Использование двумерных антенных решёток для ультразвуковой визуализации и физического воздействия на объекты в неоднородной среде» соответствует специальности 1.3.7. Акустика (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1–2.5 «Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова», предъявляемым к кандидатским диссертациям, и оформлена согласно приложениям № 8 и 9 «Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова», а ее автор — Асфандияров Шамиль Альбертович — заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.7. Акустика.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,
заведующий отделением
сегнетопiezоматериалов, приборов и устройств
Научно-исследовательского института физики
Южного федерального университета

Рыбьянец Андрей Николаевич

«16» мая 2025 года

Контактные данные:

Телефон: +7 (863) 243-41-22

E-mail: anrybyanets@sfedu.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена докторская диссертация:

01.04.07 — «Физика конденсированного состояния»

Адрес места работы:

344090, г. Ростов-на-Дону, проспект Стачки, д. 194

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Южный федеральный университет»

Телефон: +7 (863) 243-40-44; e-mail: iphys@sfedu.ru

Подпись Рыбьянца Андрея Николаевича ЗАВЕРЯЮ:

ученый секретарь НИИ физики ЮФУ,
к.ф.-м.н.

Рейзенкинд Я.А.