

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М. В. ЛОМОНОСОВА**

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

На правах рукописи
УДК 534.2

ЦЫСАРЬ Сергей Алексеевич

**МЕТОДЫ ФУРЬЕ-АКУСТИКИ И УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТОМОГРАФИИ
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ И
ИХ ПОЛЕЙ В ЖИДКОСТЯХ И ГЕЛЕОБРАЗНЫХ СРЕДАХ**

Специальность: 01.04.06 – акустика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

МОСКВА – 2011

Работа выполнена на кафедре акустики физического факультета
Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
доцент Сапожников Олег Анатольевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
Брысев Андрей Петрович

кандидат физико-математических наук,
Фокин Андрей Викторович

Ведущая организация: Нижегородский государственный
университет имени Н.И. Лобачевского

Защита диссертации состоится “12” мая 2011 года в 16:00 на заседании
Диссертационного Совета Д 501.001.67 при Московском государственном
университете имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, ГСП-1, Москва,
Ленинские горы, МГУ, физический факультет, физическая аудитория
имени Р.В.Хохлова.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке физического
факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Автореферат разослан “08” апреля 2011 года.

Ученый секретарь

Диссертационного Совета Д 501.001.67
кандидат физико-математических наук,

А.Ф. Королев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Сегодня ультразвук активно используется во многих областях науки, техники и медицины. Широкий спектр применений ультразвука связан с его способностью проникать внутрь исследуемых объектов. На этом основан целый ряд методов ультразвуковой диагностики. При использовании мощных ультразвуковых источников появляется также возможность воздействия на среду, что может быть использовано, например, для неинвазивного разрушения опухолей различных внутренних органов. Изучение соответствующих проблем, связанных с распространением высокоинтенсивных фокусированных ультразвуковых (High Intensity Focused Ultrasound, HIFU) пучков, является одним из активно развивающихся направлений современной акустики.

При использовании любого медицинского оборудования необходимо учитывать его возможное неблагоприятное влияние на организм человека. Необходимым условием использования устройств для ультразвуковой диагностики и терапии является разработка подходов стандартизации создаваемых ими волновых полей. Но несмотря на то, что HIFU системы уже используются в клиниках, до сих пор не существует общепринятых международных стандартов для описания создаваемых ими полей и их сертификации.

Для повышения качества ультразвуковой диагностики и сохранения высокой избирательности воздействия в терапии важно уметь рассчитывать пространственно-временную структуру акустического поля. Ошибки при использовании ультразвуковых систем в медицине могут стоить пациенту здоровья, а иногда и жизни. Поэтому крайне важно развитие методов для точного предсказания ультразвуковых полей. В частности, для многоэлементных фазированных решёток необходимо отслеживать возникновение и характер нежелательных боковых лепестков и паразитных максимумов, а для устройств больших волновых размеров, применяемых в терапии и хирургии, необходимо как можно точнее рассчитывать интенсивность ультразвука и размеры фокальной перетяжки. Точно предсказать тонкую пространственную структуру акустических полей невозможно без знания характера колебаний поверхности преобразователя. В

то время как характеристики электронных устройств (генераторов, усилителей, осциллографов) могут быть легко измерены и учтены при проведении измерений, параметры самих ультразвуковых преобразователей обычно известны недостаточно хорошо. Фирмы, производящие ультразвуковые преобразователи, в качестве паспортных данных сообщают лишь одномерные характеристики типа частотного или импульсного откликов; в лучшем случае приводится диаграмма направленности в дальней зоне. Поэтому на практике для описания структуры акустического поля источников приходится прибегать к определенным предположениям относительно структуры колебаний поверхности источников. Обычно принимается, что распределение нормальной компоненты колебательной скорости на поверхности преобразователя является равномерным, т.е. преобразователь колеблется как жёсткий поршень. Однако истинное распределение поля вдоль поверхности пьезоэлектрических источников ультразвука, как правило, далеко от «поршневого». Поэтому часто параметры всей системы, рассчитанные с использованием приближений (такие как диаграмма направленности, положение фокуса, интенсивность в определенных точках, симметрия поля и другие), также сильно отличаются от действительных, что приводит к ошибкам, зачастую неприемлемым для ряда приложений.

Для нахождения поля на источнике весьма перспективным является метод акустической голографии дальнего поля, который позволяет восстановить распределения давления и колебательной скорости на поверхности преобразователя. Акустической голографией обычно называют метод восстановления источника звука по измерениям акустического давления вдоль некоторой поверхности, расположенной перед этим источником. Традиционно этот метод используется для анализа источников гармонических волн. При этом для плоских, цилиндрических и сферических источников гармонических волн можно использовать подход фурье-акустики, или, иначе говоря, метод углового спектра. Математический аппарат, используемый в данных задачах был подробно разработан для описания процессов распространения электромагнитных волн в оптике. В некотором смысле акустическая голография для гармонических сигналов тождественна соответствующему варианту оптической голографии, и эта аналогия позволила создать ряд успешных схем акустической голографии. Однако для акустики имеется одно важное обстоятельство: в силу низкой, по сравнению со световыми волнами,

частоты акустических сигналов, фазу волны можно измерить непосредственно, т.е. нет необходимости использовать интерференцию со вспомогательным (опорным) пучком. Используя данные о распределении давления и колебательной скорости на поверхности преобразователя, с высокой степенью точности можно рассчитать акустическое поле, создаваемое преобразователем. Работоспособность этого метода для плоских и фокусированных источников была подтверждена в ряде работ.

В медицинских приложениях и гидроакустике, помимо плоских и фокусированных, широко используются также цилиндрические ультразвуковые пьезопреобразователи, распределение колебательной скорости на поверхности которых неизвестно. Одним из примеров использования цилиндрических источников в ультразвуковой хирургии является способ лечения мерцательной аритмии, в котором с помощью высокочастотного (порядка 9 МГц) цилиндрического излучателя «заваривается» легочная вена. Для такой задачи особенно важно знать точное распределение колебательной скорости на поверхности излучателя.

В данной работе на основе пространственного спектрального метода (метода Фурье-акустики) и принципа обращения времени с использованием интеграла Рэлея разработаны численные алгоритмы и комплекс программ, которые позволяют проводить исследование распределения колебательной скорости по поверхности цилиндрических ультразвуковых преобразователей в жидкости методом акустической голографии. Выявлена и учтена в голографическом алгоритме особенность задачи, обусловленная специфическими свойствами цилиндрически расходящихся неоднородных волн на больших волновых расстояниях от источника. Это позволило улучшить пространственное разрешение метода по сравнению со случаями плоских и фокусированных излучателей. Для проведения экспериментальной проверки работоспособности метода создана установка, позволяющая с высокой точностью производить сканирование полей, создаваемых цилиндрическими ультразвуковыми излучателями в воде.

Как уже отмечалось, для определения распределения акустического поля на поверхности ультразвуковых преобразователей больших волновых размеров, практически любой формы, очень перспективным является метод акустической голографии. Метод имеет хорошо разработанный математический аппарат, основанный на использовании принципов Фурье-

акустики или применении интеграла Рэлея. Тем не менее, восстановление распределения поля на поверхности источника возможно только при условии, что с достаточной точностью известно само положение источника относительно поверхности сбора голографической информации (поверхности сканирования). Допустимая неопределённость пространственной локализации источника для нахождения истинных характеристик акустического поля на его поверхности имеет порядок длины волны. При исследовании преобразователей, работающих на высоких частотах (более 10 МГц) или имеющих сложную форму, особенно трудно провести запись голограммы вдоль поверхности, точно локализованной относительно поверхности преобразователя. В зависимости от параметров излучателя (рабочая частота, волновые размеры, степень фокусировки) и поверхности сканирования (шаг, размеры, форма) ошибки в определении взаимного расположения поверхностей измерений и источника могут составить много длин волн, что приводит к существенным ошибкам в расчете распределений амплитуды и фазы на поверхности источника. Рассчитанное при помощи метода акустической голографии поле на источнике с учетом описанных выше трудностей может заметно отличаться от истинного, что неприемлемо для задач, требующих знания точного распределения поля в пространстве, в т.ч. положений фокусов, боковых лепестков диаграммы направленности и других. В настоящей работе разработан метод обработки данных измерения, позволяющий устранить проблему неточной локализации поверхности измерений относительно поверхности излучателя. Применение указанного метода особенно актуально для излучателей со слабой симметрией поля и излучателей с характерными размерами неоднородностей поля, сильно превышающими длину волны в среде.

Ультразвук широко используется в медицине, дефектоскопии, гидроакустике для визуализации различных объектов, обнаружение которых оптическими методами затруднено или вовсе невозможно. В последнее время развитие вычислительных технологий позволило перейти от одномерных и двумерных изображений к трехмерным картинам, позволяющим быстро и с высокой точностью получать информацию о пространственном положении объектов в интересующей области пространства. В подавляющем большинстве случаев используется эхо-импульсная техника визуализации, требующая наличия широкополосных систем излучения и приема акустических сигналов.

Однако существует ряд работ, в которых акустическая визуализация осуществляется по аналогии с оптикой, т.е. с использованием непрерывных или квазинепрерывных акустических волн. С развитием вычислительной техники стали возможными не только быстрая обработка данных и проведение расчетов с использованием больших массивов данных, но и создание новых технологий, позволяющих интегрировать блоки обработки информации в корпус преобразователей. Важным шагом вперед стало создание многоэлементных емкостных мембранных преобразователей по технологии производства микросхем на кремниевой подложке (capacitive micromachined ultrasonic transducers, CMUT). Преимуществами новых преобразователей по сравнению с традиционными пьезопреобразователями являются малые размеры элемента (один элемент, состоящий из 76 ячеек, имеет линейные размеры порядка 400 мкм), независимость соседних элементов друг от друга и возможность получения более широкополосных излучающих и приёмных систем.

В настоящей работе предложен алгоритм получения объемных изображений на основе разработанного метода акустической голографии дальнего поля в воде. Для обнаружения объектов используется зондирующее («подсвечивающее») поле, создаваемое ультразвуковым преобразователем, а результирующее рассеянное поле регистрируется в дискретном наборе точек поверхности с помощью гидрофона, закрепленного на управляемой компьютером позиционной системе. Определение положения и формы объектов проводится с помощью расчета акустического поля в исследуемом объеме методами интеграла Рэлея или углового спектра. Метод может быть применен для трехмерной визуализации в дефектоскопии, гидроакустике, а при дальнейшем развитии технологии CMUT является очень перспективным для использования в медицинской диагностике.

Проведение терапевтических и хирургических процедур с использованием мощного фокусированного ультразвука требует разработки неразрушающих методов контроля температуры в фокальной области терапевтического излучателя. При проведении хирургических операций с использованием мощных фокусированных ультразвуковых пучков производится нагрев малой области ткани (до нескольких десятков мм³) до высоких температур (70 – 90 °С) за достаточно короткое время (порядка секунды). Вследствие того, что нагреваемая область обладает очень малыми размерами и высокой степенью неоднородности температурного поля, возникают определенные трудности

проведения измерений температуры. При не очень высоких температурах нагрева (порядка нескольких градусов Цельсия), как это происходит, например, при гипертермии, возможно применение ультразвуковых методов контроля температуры. При решении этой проблемы особое внимание уделяется разработке методов измерения и контроля температуры с использованием стандартных приборов ультразвуковой диагностики.

В настоящей работе разработан метод контроля температуры в фокальной области терапевтического излучателя по задержке ультразвукового импульса, пересекающего нагретую область в поперечном направлении. Предложенный метод позволяет проводить измерение температуры без численного моделирования процесса распространения мощных акустических волн и нагрева фокальной области. Метод был экспериментально опробован при нагреве мощным фокусированным ультразвуком гелеобразной среды - полимерного фантома биологической ткани. Пространственная структура акустического поля мощного фокусированного сферического излучателя в фокальной области в большинстве случаев обладает аксиальной симметрией, что позволяет значительно упростить алгоритм расчета температурного профиля в фокальной области в исследуемом образце. Для определения истинной структуры акустического поля можно использовать метод акустической голографии ультразвуковых источников, о котором было сказано выше. Проведенные в работе эксперименты и численное моделирование процесса распространения диагностического импульса через тепловую неоднородность с учетом дифракционных эффектов путем сравнения результатов позволили установить границы применимости метода в зависимости от параметров нагрева.

Цели и задачи диссертационной работы

Основной целью диссертационной работы являлось теоретическое и экспериментальное исследование пьезоэлектрических излучателей и их полей в жидкостях и гелеобразных средах методами ультразвуковой томографии и акустической голографии, включая методы фурье-акустики и интеграла Рэлея. В соответствии с заявленной целью было намечено решение следующих практически значимых задач:

1. Создание экспериментальной установки для автоматизированного измерения пространственного распределения акустического давления, создаваемого цилиндрическими пьезокерамическими ультразвуковыми преобразователями в жидкостях.
2. Разработка голографического алгоритма нахождения параметров акустического поля на поверхности цилиндрических ультразвуковых источников, его численная и экспериментальная проверка, анализ разрешающей способности метода.
3. Сравнительный анализ методов углового спектра и интеграла Рэлея с использованием численного моделирования и физического эксперимента с реальными преобразователями, как на примере плоских излучателей, так и на примере цилиндрических источников.
4. Разработка алгоритма обработки голографических данных путём достижения максимальной резкости изображения в зонах локализации резких неоднородностей (например, на краю пьезопреобразователя) для улучшенной локализации ультразвукового источника при голографии методом фурье-акустики.
5. Развитие метода акустической голографии для визуализации трехмерных рассеивателей. Экспериментальная демонстрация работоспособности метода.
6. Создание экспериментальной установки и исследование в лабораторных условиях распределения температурного поля в полимерном образце, создаваемого двумя типами тепловых источников: нихромовой нитью и мощным фокусированным ультразвуковым пучком.
7. Развитие аналитической и численной моделей для нахождения распределения температурного поля в исследуемом образце и анализ границ применимости указанных моделей на основе рассмотрения дифракционных эффектов на возникающей тепловой неоднородности и сравнения с результатами экспериментов.

Научная новизна работы

1. Проведен сравнительный анализ методов фурье-акустики и интеграла Рэлея для случаев плоских и цилиндрических излучателей.

2. Предложен метод улучшенного (с точностью порядка длины волны в среде) определения положения поверхности преобразователя относительно поверхности измерений при восстановлении распределения акустического поля на поверхности излучателя методом акустической голографии.
3. Разработан алгоритм трехмерной акустической голографии, позволяющий определять положение и форму объектов в жидкостях при использовании монохроматической ультразвуковой волны.
4. Обосновано применение предлагаемого метода акустической томографии для исследования распределения температуры в нагреваемом мощным ультразвуком образце при условии аксиальной симметрии греющего поля.
5. Исследовано влияние дифракционных эффектов на амплитуду и фазу диагностического фокусированного импульса, проходящего через тепловую неоднородность.

Достоверность представленных в диссертационной работе результатов подтверждается проверочными численными и физическими экспериментами, а также соответствием результатов экспериментов априорной информации и теоретическим расчетам.

Практическая ценность

1. В ряде областей науки, техники и медицины, где могут быть использованы цилиндрические ультразвуковые источники и требуется знание тонких особенностей распределения акустического поля, предлагаемый метод акустической голографии цилиндрических источников может оказаться незаменимым.
2. Предложенный алгоритм локализации поверхности ультразвуковых преобразователей при определении истинного распределения акустического поля на их поверхности расширяет возможности применения метода акустической голографии, в результате формируя мощный инструмент для получения полной информации об акустических преобразователях.
3. Метод акустической голографии дальнего поля может быть применен для трехмерной визуализации в дефектоскопии, гидроакустике, а при дальнейшем развитии технологии CMUT может быть использован в медицинской диагностике.

4. Предложенный метод акустической томографии для определения температурного поля может быть применен в медицине для контроля температуры при проведении хирургических операций с помощью мощного фокусированного ультразвука или в других областях, связанных с необходимостью неинвазивного или неразрушающего контроля температуры в области нагрева при условии аксиальной симметрии.

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод акустической голографии дальнего поля на основе фурье-акустики является более точным и менее ресурсоемким по сравнению с интегралом Рэлея, как в базисе плоских, так и цилиндрических волн.
2. Метод обратного распространения с использованием алгоритма фурье-акустики даже при проведении измерений на расстояниях заметно превышающих длину волны позволяет восстановить распределение акустического поля на поверхности цилиндрических пьезокерамических излучателей с точностью, превосходящей стандартный дифракционный предел.
3. Точная локализация поверхности пьезопреобразователей может быть проведена с помощью процедуры численной фокусировки на границе исследуемых излучателей при обратном расчете поля с помощью метода фурье-акустики.
4. С точностью, ограниченной дифракционным пределом (половина длины волны), с помощью методов акустической голографии на основе фурье-акустики и интеграла Рэлея возможно определение формы и положения объемных рассеивателей в жидкостях.
5. Предложенный метод акустической томографии нагретой области позволяет восстановить профиль температуры в условиях аксиальной симметрии поля излучателя мощного фокусированного ультразвука.

Апробация работы

Вошедшие в диссертацию материалы докладывались на основных профильных российских и международных конференциях последних лет: XII международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (2-3 марта 2006 г., Москва),

X и XI Всероссийских научных школах-семинарах «Волновые явления в неоднородных средах» (май 2006 г., май 2008 г., Звенигород), XIV международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов 2007» (10-15 апреля 2007 г., Москва), XVII международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2010» (12-15 апреля 2010 г., Москва), XIX сессии Российского Акустического Общества (24-28 сентября 2007 г., Нижний Новгород), XXII сессии Российского Акустического Общества (15-17 июня 2010 г., Москва), на Международном Симпозиуме по ультразвуку IEEE IUS 2009 (19-23 сентября 2009 г., Рим, Италия), на научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные аспекты инновационных проектов физического факультета МГУ», на 10-м Французском конгрессе по акустике CFA 10 (12-16 апреля 2010 г., Лион, Франция) и 1-м совместном семинаре Московского Государственного Университета и Центральной Школы Лиона (13-14 декабря 2010 г., Лион, Франция). Результаты исследований обсуждались на научных семинарах кафедры акустики физического факультета МГУ.

Публикации

По результатам исследований, представленных в диссертации, опубликовано 17 научных работ, список которых приведен в конце автореферата, в том числе 3 статьи в реферируемых журналах.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из общего вводного раздела, четырех глав, заключения и списка литературы. Каждая глава включает в себя короткое введение и выводы. Список цитируемой литературы включает 122 наименования, общий объем работы составляет 138 страниц текста, включая 61 рисунок.

Личный вклад автора

Все изложенные в диссертационной работе оригинальные результаты получены автором лично либо при его непосредственном участии.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **Введении** обоснована актуальность исследуемой проблемы, сформулированы цели работы, описано краткое содержание работы по главам.

Первая глава диссертационной работы посвящена теоретическому описанию и практическому применению методов фурье-акустики и интеграла Рэля для исследования ультразвуковых цилиндрических источников. В § 1.1 производится постановка задачи. Описание цилиндрических источников и создаваемых ими акустических полей удобно производить в цилиндрических координатах (r, φ, z) . Рассматривается цилиндр радиуса r_0 , ось которого совпадает с осью цилиндрической системы координат. Цилиндр излучает на частоте f гармоническую волну, в которой акустическое давление около излучателя описывается неизвестным распределением $p(r_0, \varphi, z)$. С помощью созданной установки имеется возможность проводить измерения создаваемого излучателем поля $p(r, \varphi, z)$ на удалении от начального цилиндра по замкнутой цилиндрической поверхности большего радиуса $r > r_0$. Задача состоит в том, чтобы рассчитать распределение акустического поля на поверхности цилиндрических преобразователей на основе измеренного распределения акустического давления на удаленной цилиндрической поверхности.

В § 1.2 описывается теория методов фурье-акустики и интеграла Рэля и проводится их непосредственное сравнение на примере плоского и цилиндрического излучателей. Для цилиндрических источника и поверхности измерений метод фурье-акустики связывает спектры полей акустического давления на разных цилиндрических поверхностях следующим образом:

$$P_m(k_z; r_1) = \Pi_m(k_z; r_0, r_1) \cdot P_m(k_z; r_0), \quad (1)$$

$$\text{где } \Pi_m(k_z; r_0, r_1) = \frac{H_m^{(1)}(\sqrt{k^2 - k_z^2} r_1)}{H_m^{(1)}(\sqrt{k^2 - k_z^2} r_0)} - \quad (2)$$

- пропагатор, $k = \omega / c$ - волновое число, k_z задаёт пространственную частоту в направлении оси z , а номер m характеризует частоту осцилляций в зависимости от полярного угла (число m равно количеству периодов выбранной спектральной компоненты при полном обходе окружности

цилиндра), $H_m^{(1)}$ - функции Ханкеля 1-го рода. Распределение акустического давления $p(r, \varphi, z)$ и его пространственный спектр $P_m(k_z; r)$ на цилиндре r связаны друг с другом посредством двумерного преобразования Фурье:

$$p(r, \varphi, z) = \frac{1}{2\pi} \sum_{m=-\infty}^{\infty} e^{im\varphi} \int_{-\infty}^{\infty} dk_z P_m(k_z; r) e^{ik_z z}, \quad (3)$$

$$P_m(k_z; r) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} d\varphi e^{-im\varphi} \int_{-\infty}^{\infty} dz e^{-ik_z z} p(r, \varphi, z). \quad (4)$$

Метод пространственного спектра в случае цилиндрических источников имеет специфику по сравнению со случаем квазиплоских источников: мелкомасштабные компоненты спектра, имеющие вид затухающих (нераспространяющихся) волн вблизи от источника, с удалением от источника превращаются в распространяющиеся волны. Спектральная компонента, соответствующая полярному углу, равна $k_\varphi = 2\pi/\lambda_\varphi$, где $\lambda_\varphi = 2\pi r/m$ - пространственный период возмущения на расстоянии r , соответствующий угловой компоненте с индексом m . Иначе говоря, эффективное волновое число $k_\varphi(r) = m/r$, а вместе с ним и условие $\sqrt{k_\varphi^2 + k_z^2} \leq k$, при котором волна является распространяющейся, оказываются зависящими от расстояния. Использование таких волн смешанного типа позволяет повысить разрешающую способность голографии. Для возможности проведения голографии цилиндрических источников методом интеграла Рэлея предложена модификация, заключающаяся в наложении ограничений на область интегрирования исходя из приближения геометрической акустики.

$$v(r_0, z, \varphi) = \int_{\varphi - \arccos(r_0/r_1)}^{\varphi + \arccos(r_0/r_1)} r_1 d\varphi' \int_{z_{\min}}^{z_{\max}} dz' P_H(r_1, z', \varphi') K(z - z', \varphi - \varphi'), \quad (5)$$

$$K(\zeta, \psi) = \frac{i}{2\pi\rho c} \frac{e^{-ikR}}{kR^2} \cdot \left[\cos\psi \cdot \left(\frac{1}{R} + ik \right) + \right. \\ \left. + (r_0 - r_1 \cos\psi) \cdot (r_1 - r_0 \cos\psi) \cdot \left(\frac{3}{R^3} + \frac{3ik}{R^2} - \frac{k^2}{R} \right) \right]. \quad (6)$$

Здесь z_{\min} и z_{\max} задают границы интервала изменения осевой координаты на области сканирования, диапазон изменения полярного угла задается величинами $\varphi \pm \arccos(r_0/r_1)$, $R = \sqrt{r_0^2 + r_1^2 - 2r_0r_1 \cos\psi + \zeta^2}$. В параграфе приводятся результаты численного моделирования.

В § 1.3 описана экспериментальная установка, специально созданная на кафедре акустики физического факультета МГУ для проведения экспериментов по акустической голографии цилиндрических источников, представлена процедура проведения измерений и приведены результаты физических экспериментов по голографии цилиндрических пьезопреобразователей методами углового спектра и интеграла Рэлея. На рис. 1 показаны результаты действия метода акустической голографии для конкретных цилиндрических пьезопреобразователей с искусственно созданными неоднородностями (буква *M* из пластилина на рис. 1а, буквы *PRI* из воска на рис. 1в) на их поверхности.

В § 1.4 производится анализ разрешающей способности методов интеграла Рэлея и углового спектра для исследования цилиндрических источников. Показано, что при использовании упомянутых выше волн смешанного типа

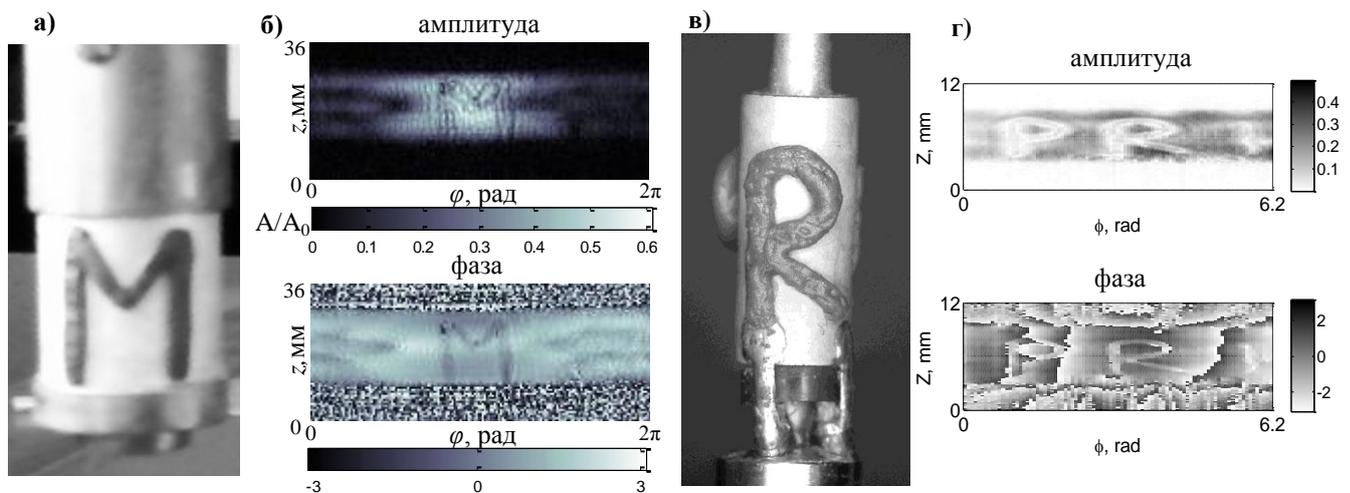


Рис. 1. Фотография излучателей с наклеенными неоднородностями: $r_0 = 9.25$ мм, $l = 20$ мм, $f = 1.528$ МГц (а), $r_0 = 1.35$ мм, $l = 6$ мм, $f = 9$ МГц (в). Восстановленные поля амплитуды и фазы давления для соответствующих излучателей с расстояний 40 мм (б), 20 мм (г).

можно повысить разрешающую способность голографии, и при восстановлении поля на источнике даже с поверхности, расположенной на удалении десятков длин волн от источника, превысить стандартный дифракционный предел по угловой координате. В § 1.5 представлены выводы Главы 1.

Во **второй главе** диссертационной работы представлен метод, позволяющий устранить проблему неточной локализации поверхности измерений относительно поверхности излучателя, которая особенно актуальна для излучателей со слабой симметрией поля и излучателей с характерными размерами неоднородностей поля, сильно превышающими длину волны в среде. В § 2.1 производится описание основных проблем голографического метода восстановления акустического поля на поверхности ультразвуковых источников в жидкостях.

В § 2.2 описан предлагаемый метод улучшения голографии ультразвуковых источников и приводятся результаты проверки действия метода на численной модели. Метод основан на принципе фокусировки, аналогичном оптическому. Для компенсации ошибки, возникающей в результате неточного определения расстояния до поверхности измерений, производится фокусировка на краю преобразователя, который в большинстве случаев достаточно хорошо выражен в виде резкого перепада амплитуды давления или нормальной компоненты колебательной скорости. Для компенсации ошибки взаимной локализации поверхностей измерений и источника, связанной с отклонениями на некоторые углы, предлагается использование фазового метода. Для нахождения углов поворота проводится построение набора поверхностей, имеющих форму источника и расположенных на одном удалении от поверхности измерений, но ориентированных под разными углами. На каждой поверхности проводится расчет акустического поля. Заданием ограничивающего условия на интегральный градиент фазы для каждого виртуального источника достигается выбор определенных углов, при которых фаза на поверхности источника меняется слабо. Уменьшением шага по углу и ужесточением ограничивающего условия на интегральный фазовый градиент можно с требуемой точностью обнаружить положение истинной поверхности источника.

В § 2.3 приведены основные результаты использования метода применительно к реальным излучателям. В § 2.4 представлены выводы Главы 2.

Третья глава диссертационной работы посвящена акустической голографии объемных объектов. В § 3.1 производится постановка задачи. Она состоит в определении положения поверхности исследуемых объектов. В работе это осуществляется по аналогии с методом, описанным в предыдущей главе. Для поиска поверхности производится фокусировка на неоднородностях поля, которые имеют наибольшую четкость на поверхности рассеивателя.

В § 3.2 приводится описание математического аппарата, используемого для трехмерной акустической голографии. Это уже упоминавшиеся методы интеграла Рэлея и фурье-акустики, с помощью которых проводится расчет акустического поля в исследуемом объеме пространства для последующего анализа и выделения границ находящихся в объеме рассеивателей. Представлены результаты проверки работоспособности метода путем численного моделирования с использованием идеализированных точечных рассеивателей и проведен их анализ.

В § 3.3 представлена экспериментальная часть работы по трехмерной акустической голографии. Проводится описание установки, созданной на кафедре акустики физического факультета МГУ. Установка состоит из механической позиционной системы с тремя пространственными и одной поворотной степенями свободы с закрепленным на подвижной ее части

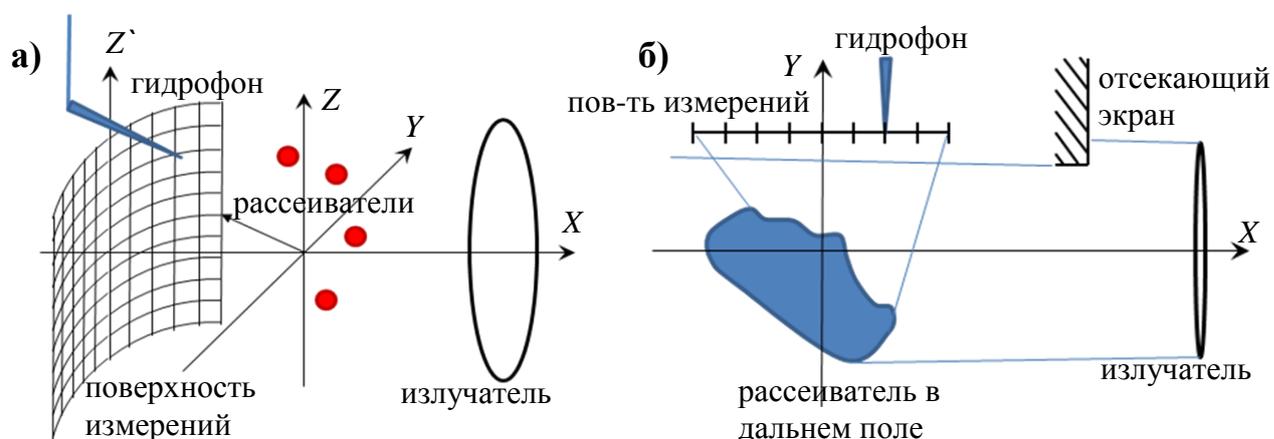


Рис. 2. Схема экспериментов по трехмерной голографии рассеивателей: (а) теневой режим, используется для слабых или рассеивателей малых волновых размеров, (б) режим отраженного поля, применяется для сильных рассеивателей.

гидрофоном для сканирования акустических полей в пространстве, источника «подсвечивающего» акустического поля и исследуемых рассеивателей. Измерения проводятся в воде. Описаны процедуры проведения измерений в режиме теневого сканирования (рис. 2а), когда поверхность измерений расположена за рассеивателями и попадает в область прямой экспозиции подсвечивающим полем, и в режиме отраженного поля (рис. 2б), когда на поверхность измерений попадает только отраженная от рассеивателя часть акустического поля.

В § 3.4 описываются алгоритмы обработки полученных в эксперименте полей. Для теневого метода измерений нахождение рассеянного поля производится исключением «подсвечивающего» поля, для чего проводится дополнительное измерение акустического поля без рассеивателей. Представлены результаты восстановления пространственного положения точечных рассеивателей (рис. 3а) в виде пластиковых шариков диаметром 3 мм при использовании подсвечивающего монохроматического пучка с частотой 1 МГц. Показано, что улучшение аксиального (вдоль оси X, рис. 3а) разрешения достигается увеличением углового размера поверхности измерений, в частности без увеличения ее размеров при сохранении количества шагов и

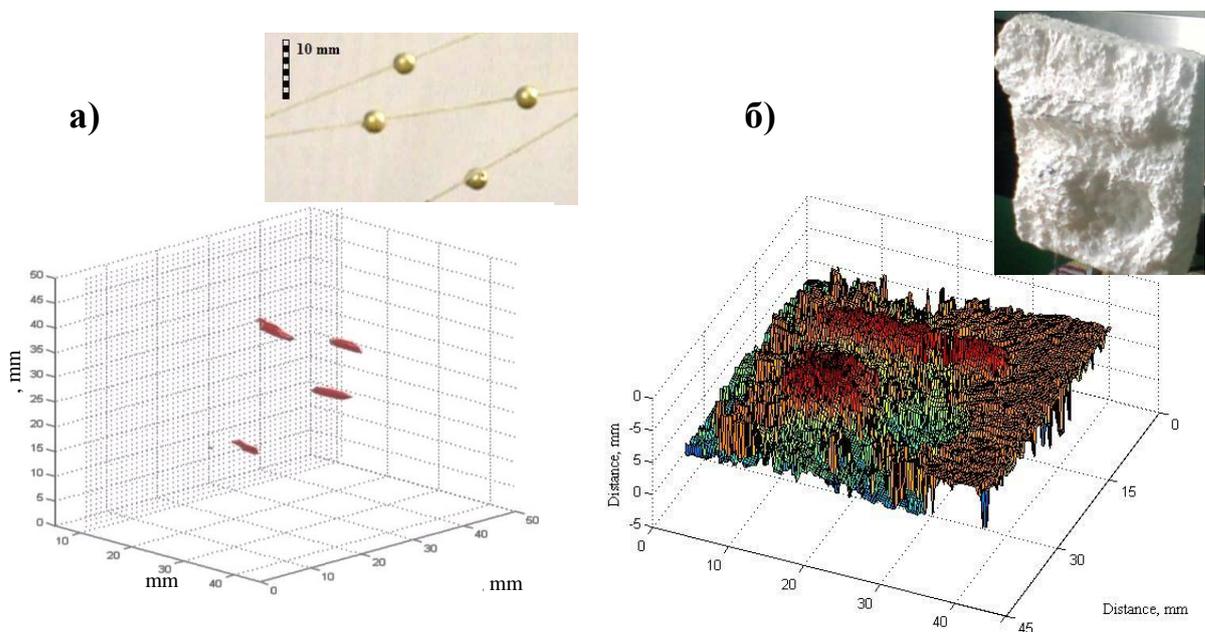


Рис. 3. Фотография рассеивателей (вверху) и результат восстановления их положения методом объемной акустической голографии с плоской поверхности измерений (внизу) (а). Фотография поверхности пенопласта (вверху), результат восстановления его формы (внизу) (б).

времени измерений это осуществляется искривлением поверхности. Описаны результаты использования метода акустической голографии для нахождения формы поверхности, представляющей собой шероховатую поверхность пенопласта размером 6х6 см (рис. 3б). При облучении такой поверхности монохроматической волной проявляется структура поля, состоящая из спеклов. Для уменьшения их влияния проводились измерения на частотах, смещенных относительно друг друга в диапазоне 3.5 МГц – 4.6 МГц. В § 3.5 представлены основные выводы Главы 3.

Четвертая глава посвящена методу акустической томографии распределения температуры в фокальной области фокусированного терапевтического преобразователя. Метод использует приближение аксиально-симметричного распределения температуры в нагреваемой области. Приводятся результаты ряда численных и физических экспериментов, в которых была проверена работоспособность метода. Описаны ограничения метода и проведен их анализ.

В § 4.1 представлен обзор литературы по методам дистанционного измерения температуры при проведении процедур с использованием мощного фокусированного ультразвука. Отмечены важные этапы развития, основные экспериментальные результаты и теоретические идеи, сформировавшие основу данной области.

В § 4.2 рассматриваются теоретические основы метода акустической томографии распределения температуры при условии аксиальной симметрии нагретой области и проводится проверка работоспособности метода с использованием численной модели. В работе используется схема метода, представленная на рис. 4. Образец изготовлен из материала, близкого по акустическим и теплофизическим параметрам к мягкой биологической ткани, и имеет форму куба со стороной $2R$. Нагретая область обладает свойством аксиальной симметрии, ее ось перпендикулярна плоскости рисунка. Зондирующий импульс пересекает нагретую область на расстоянии y от оси. Измеряется время пробега диагностического импульса от излучателя к приемнику через образец с тепловой неоднородностью на разных расстояниях y . Изменение времени пробега связано с изменением распределения температуры в образце. Предложенная схема позволяет восстановить распределение температуры с помощью решения обратной задачи в условиях

аксиальной симметрии. В этом случае томографическая задача сводится к решению интегрального уравнения, связывающего измеряемую задержку пробного импульса τ , пересекающего нагретую область на разных расстояниях от оси мощного УЗ излучателя, с распределением температуры вдоль пути распространения этого импульса.

$$T(r) = -\frac{1}{\pi\gamma} \cdot \int_0^{+\infty} \frac{d\tau(y+r)}{\sqrt{(y+r)^2 - r^2}} dy, \quad (7)$$

$$\text{где } \gamma = \frac{c_\theta - c_0}{c_\theta c_0} \beta - \frac{1}{c_0^2} \frac{dc}{dT}, \quad (8)$$

$r = \sqrt{x^2 + y^2}$, $T(r)$ – искомый профиль температуры, представляет собой отклонение температуры в каждой точке от начальной T_0 , c_θ – скорость звука в воде, c_0 – скорость звука в образце при температуре T_0 , dc/dT – температурный коэффициент скорости звука в образце, β – линейный коэффициент теплового расширения образца. Данная методика не требует знания пространственной структуры поля давления мощного УЗ излучателя, мощности излучателя, коэффициентов поглощения УЗ и теплопроводности, требуется только наличие аксиальной симметрии этого поля. В работе приводятся результаты численного моделирования с использованием гауссового профиля температуры, подтверждающие работоспособность данного алгоритма.

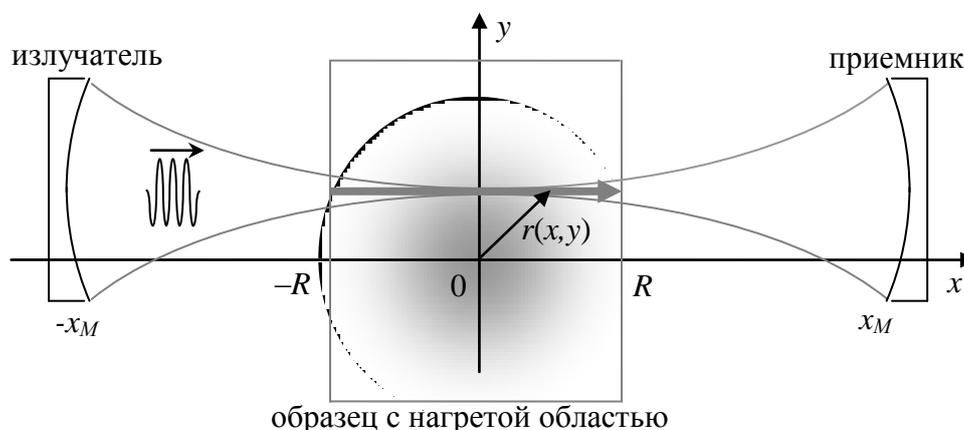


Рис. 4. Схема расположения источника и приемника зондирующего импульса для регистрации времени его задержки на тепловой неоднородности

В § 4.3 описывается экспериментальная установка, созданная на кафедре акустики физического факультета МГУ. Автор диссертационной работы участвовал в создании установки, лично проводил эксперимент и осуществлял анализ полученных данных. Перед проведением измерений осуществлялась подготовка установки и определение температурной зависимости скорости звука в образце. Диагностические импульсы создавались и принимались преобразователями с рабочей частотой около 3 МГц, излучатель мощного УЗ работал на частоте 2 МГц. В диссертационной работе представлены результаты измерений распределения температуры вблизи оси тонкой нагретой проволоки, создающей цилиндрическое аксиально-симметричное температурное поле в образце. Проверка полученных значений температуры осуществлялась по показаниям термопар, помещенных на заданных расстояниях от оси проволоки.

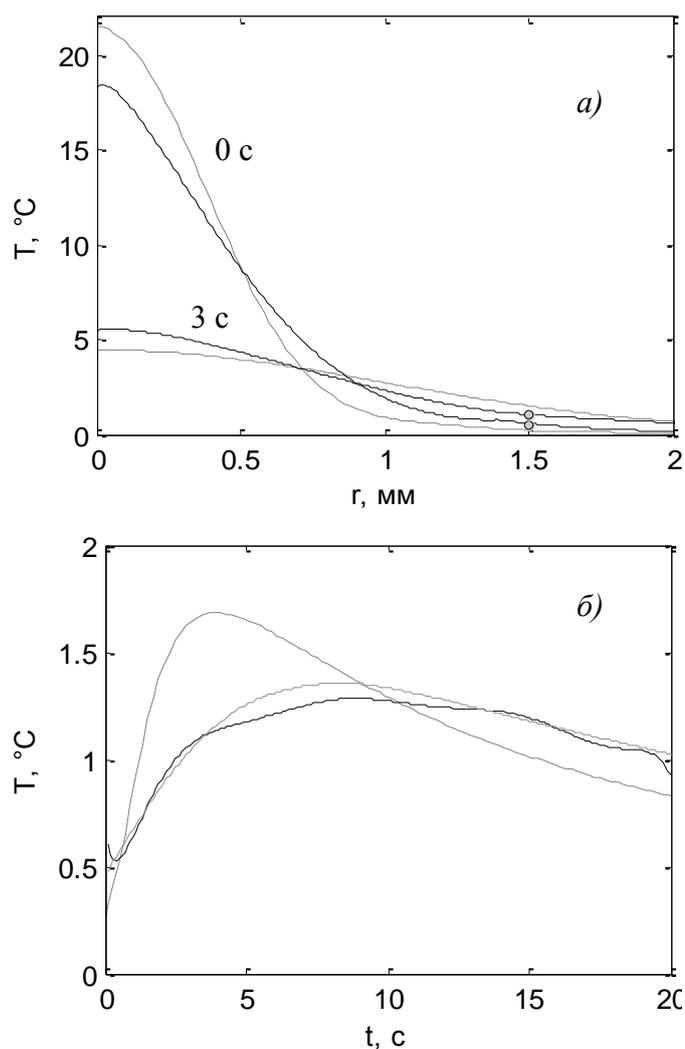


Рис. 5. Радиальные распределения температуры сразу после окончания нагрева мощным УЗ пучком и через 3 с. Сплошная черная линия – результат восстановления температуры по измеренному и сглаженному распределению времени задержки вдоль оси y , пунктирная линия – определение температуры по значению времени задержки импульса, проходящего через фокус с учетом решения уравнения теплопроводности. Точка на расстоянии 1.5 мм от фокуса – показания термопары (а). Эти же линии на (б) представляют зависимости температуры от времени наблюдения на расстоянии 1.5 мм от фокуса. Показания термопары представлены серой линией.

Далее в параграфе приведены результаты измерений распределения температуры в фокальной области мощного УЗ излучателя. Характерный профиль радиального распределения температуры при нагрева образца УЗ пучком мощностью 8.4 Вт в течение 0.5 секунд, что обеспечивало повышение температуры в фокусе на 20-25 °С представлен на рис. 5а. Показаны результаты восстановления температурного профиля сразу после окончания нагрева мощным УЗ пучком и через 3 с после этого (сплошная линия). Пунктиром представлены результаты восстановления температуры с использованием метода, основанного на решении уравнения теплопроводности. Показания термопары на расстоянии 1.5 мм от центра фокуса греющего преобразователя представлены на графике точкой. На таком удалении от центра нагреваемой области влияние термопары на распределение тепла практически отсутствует. На рис. 5б представлена временная зависимость температуры на расстоянии 1.5 мм от фокуса для трёх случаев: рассчитанная с использованием метода, основанного на решении уравнения теплопроводности (пунктирная линия), полученная на основе многократного зондирования нагретой области с помощью алгоритма (7) (черная линия) и измеренная термопарой (серая линия). Из сравнения представленных данных можно сделать вывод о том, что метод определения температуры на основе многократного зондирования нагретой области более точно описывает распределение температуры в образце, что подтверждается совпадением значений восстановленной температуры и температуры, измеренной термопарой на расстоянии 1.5 мм от фокуса, а также повторяемостью результатов.

В § 4.4 описаны ограничения метода и проведен их анализ. Во-первых, рассматривается применимость лучевого приближения для использованных в диссертации рабочих параметров экспериментальной системы. Во-вторых, проводится анализ и обсуждение применимости приближения аксиальной симметрии нагретой области применительно к реальным фокусированным излучателям. Приведены результаты исследования акустического поля использованного излучателя мощного ультразвука методом акустической голографии. Показано, что даже при отсутствии аксиальной симметрии поля на поверхности излучателя поле в фокальной области, а, следовательно, и поле температур, может быть аксиально-симметричным. В-третьих, производится анализ влияния дифракционных эффектов на тепловой неоднородности на

работоспособность метода при различных режимах нагрева. В § 4.5 представлены выводы Главы 4.

В **Заключении** сформулированы основные результаты и выводы работы:

1. Разработан алгоритм для нахождения распределений акустического давления и колебательной скорости на поверхности цилиндрических ультразвуковых преобразователей в жидкостях методами фурье-акустики и интеграла Рэлея путем измерения акустического давления в дискретном наборе точек на замкнутой цилиндрической поверхности, расположенной соосно с источником. Метод позволяет предсказывать пространственную структуру акустического поля для рассматриваемых преобразователей. Экспериментально показано, что метод позволяет определять структуру искусственно заданного распределения акустического поля на поверхности источника в мегагерцовом диапазоне частот в воде.
2. На основе численной модели показано, что в рамках фурье-акустики для цилиндрической геометрии влияние неоднородных волн существенно даже на расстояниях много больших длины волны, что позволяет использовать эти волны для улучшения разрешающей способности в угловом направлении. В этом случае угловая разрешающая способность зависит от динамического диапазона измерительной системы.
3. Разработан метод, позволяющий исключить возможную неточность взаимного расположения поверхностей измерения и источника для улучшения метода акустической голографии излучателей различных типов, форм и размеров в широком диапазоне частот. Экспериментально и численно показано, что метод обладает высокой точностью и пространственным разрешением порядка длины волны при определении положения поверхностей ультразвуковых одноэлементных или многоэлементных излучателей в жидкости с известным сдвигом фаз между элементами.
4. Предложен метод объемной акустической голографии, позволяющий проводить локализацию объемных рассеивателей в жидкостях путем регистрации рассеянных на объектах акустических полей, создаваемых пьезоэлектрическими излучателями. Работоспособность метода проверена экспериментально при определении двух типов рассеивателей: объектов

малых волновых размеров и распределенных объектов с шероховатой поверхностью, размер неровностей которой сравним с длиной волны в среде. Экспериментально и численно показано, что предлагаемый метод позволяет обнаружить положение рассеивателей первого типа без точного определения их формы. Показано, что поперечное (в плоскостях, параллельных плоскости измерений) разрешение метода в большинстве случаев определяется длиной волны в среде, продольное - апертурой поверхности измерений.

5. Разработана методика акустической томографии для определения температуры в гелеобразных средах в области фокуса греющего ультразвукового излучателя по задержке ультразвукового импульса, пересекающего нагретую область в поперечном направлении, позволяющая определить профиль температуры в условиях аксиальной симметрии нагретой области. Техника исследована численно для выявления точности и оптимальных параметров работы. Экспериментально показано, что метод обладает высокой точностью определения температуры (до 1°C) при выполнении условий прямых лучей и аксиальной симметрии нагретой области. Проверена справедливость использования приближений при нагревах с применением реального фокусированного излучателя.
6. Разработана теоретическая модель и создан численный алгоритм, позволяющий исследовать влияние дифракционных эффектов при прохождении диагностического импульса через тепловую неоднородность и определять точность томографического метода акустической термометрии. Показано, что в условиях проведенных экспериментов использованное приближение прямых лучей нарушается при нагревах выше 80° и градиентах температуры более 50 °C/мм

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. Цысарь С.А., Сапожников О.А., Андреев В.Г. *Акустическая томография распределения температуры при нагреве среды фокусированным ультразвуковым пучком* // Известия РАН. Серия физическая, 2009, Т.73, №4, с. 558-561.
2. Бобкова С.М., Цысарь С.А., Хохлова В.А., Андреев В.Г. *Дифракционные эффекты при распространении фокусированного ультразвукового импульса в среде с тепловой неоднородностью* // Акустический журнал. 2009, т. 55, № 4–5, с. 457–465.
3. Цысарь С.А., Синельников Е.Д., Сапожников О.А. *Применение метода акустической голографии для исследования ультразвуковых источников цилиндрической формы* // Акустический журнал, 2011, т.57, №1, с. 104–116.
4. Цысарь С.А., Бобкова С.М., Хохлова В.А., Андреев В.Г. *Дистанционный контроль теплового воздействия ультразвука на биологические ткани по измерению задержки зондирующего импульса* // Вестник молодых ученых “Ломоносов”, выпуск IV, 2007, с. 324-331.
5. Цысарь С.А., Бобкова С.М., Хохлова В.А., Андреев В.Г. *Измерение распределения температуры в фокальной области ультразвукового излучателя в резиноподобном полимере* // Сборник трудов XIX сессии РАО, 24-28 сентября 2007, Нижний Новгород, Т. 2, с. 107-111.
6. Бобкова С.М., Цысарь С.А., Андреев В.Г., Хохлова В.А. *Моделирование распространения диагностического импульса в среде с тепловой неоднородностью для дистанционного контроля терапевтического воздействия ультразвука на биологические ткани* // Сборник трудов XIX сессии РАО, 24-28 сентября 2007, Нижний Новгород, Т. 3, с. 117-120
7. Цысарь С.А., Бобкова С.М., Хохлова В.А., Андреев В.Г. *Амплитудные эффекты при дифракции фокусированного ультразвукового импульса на тепловой неоднородности* // Труды школы-семинара “Волны-2008”, часть 1, с. 18-21.
8. Цысарь С.А., Сапожников О.А., Андреев В.Г. *Восстановление пространственно-временного распределения температуры в фокальной области ультразвукового излучателя* // Труды школы-семинара “Волны-2008”, часть 1, с.67-70.
9. Цысарь С.А., Бобкова С.М., Крит Т.Б., Андреев В.Г. *Дистанционное измерение температуры в фокальной области ультразвукового терапевтического излучателя* // Двенадцатая Международная Научно-техническая Конференция студентов и аспирантов: Тезисы докладов в 3-х томах – М.: МЭИ, 2006, Т. 1, с. 318-319.

10. Цысарь С.А., Бобкова С.М., Крит Т.Б., Хохлова В.А., Андреев В.Г. *Измерение распределения температуры в фокальной области ультразвукового излучателя в фантомах биологической ткани // Тезисы докладов X всероссийской школы-семинара «Волновые явления в неоднородных средах», 2006, Звенигород, Секция 7, с.66.*
11. Крит Т.Б., Цысарь С.А., Андреев В.Г. *Измерение сдвигового модуля упругости резиноподобного полимера методом крутильных колебаний // Тезисы докладов X Всероссийской школы-семинара «Волновые явления в неоднородных средах», 2006, Звенигород, Секция 7, с.49.*
12. Цысарь С.А., Бобкова С.М., Хохлова В.А., Андреев В.Г. *Дистанционный контроль теплового воздействия ультразвука на биологические ткани по измерению задержки зондирующего импульса // Тезисы докладов Международной конференции «Ломоносов-2007», Москва, Секция «Физика», с. 146-148.*
13. Цысарь С.А., Бобкова С.М., Хохлова В.А., Андреев В.Г. *Дистанционный контроль теплового воздействия ультразвука на биологические ткани по измерению задержки зондирующего импульса //*, III Троицкая конференция «Медицинская физика и инновации в медицине», Программа, Новые биомедицинские методы, приборы, материалы, с. 19-20.
14. Tsysar S.A., Sapozhnikov O.A. *Ultrasonic holography of 3D objects // Proceedings of 2009 IEEE International Ultrasonic Symposium (Rome, Italy, September 19-23, 2009), p. 737-740*
15. Tsysar S.A., Sapozhnikov O.A. *The characterization of the cylindrical ultrasonic transducer surface vibration using far-field acoustical holography // Proceedings XXII session of the RAS, 15-17 June 2010, Moscow. p. 304-307*
16. Иваницкий И.О., Цысарь С.А. *Акустическая голография пьезопреобразователей: сравнение методов фурье-акустики и интеграла Рэлея // Тезисы докладов Международной конференции «Ломоносов-2010», Москва. Секция «Физика», с. 58-60.*
17. Tsysar S.A., Sapozhnikov O.A. *Ultrasonic far-field holography of point scatterers and interfaces // Proceedings of 10th French Congress of Acoustics (Lyon, 12-16 April 2010). p 199-200.*