

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
им. М.В. ЛОМОНОСОВА

---

Физический факультет

На правах рукописи

УДК 534

Морозов Андрей Викторович

**РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ  
АКУСТИЧЕСКОЙ ГОЛОГРАФИИ И ЛАЗЕРНОЙ  
ВИБРОМЕТРИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ  
УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ В ЖИДКОСТЯХ**

Специальность 01.04.06 – акустика

**А в т о р е ф е р а т**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2006

Работа выполнена на кафедре акустики физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (МГУ).

**Научный руководитель:**

кандидат физико-математических наук

*Сапожников О.А.*

**Официальные оппоненты:**

доктор физико-математических наук, профессор

*Карабутов А.А.*

кандидат физико-математических наук

*Фокин А.В.*

**Ведущая организация:**

Научный Центр Волновых Исследований при Институте Общей Физики РАН  
(НЦВИ ИОФАН)

Защита диссертации состоится « 14 » декабря 2006 года в 16 часов на заседании Диссертационного Совета Д.501.001.67 в МГУ им. Ломоносова по адресу: 119992, г. Москва, Ленинские горы, МГУ, физический факультет, аудитория ЦФА.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (МГУ).

Автореферат разослан «      » ноября 2006 г.

Ученый секретарь

Диссертационного Совета Д.501.001.67

кандидат физико-математических наук, доцент

*Королев А.Ф.*

## **Общая характеристика работы**

### **Актуальность темы**

Для создания ультразвука широко применяются пьезоэлектрические излучатели. Их поверхности колеблются неравномерно, либо из-за структуры самого излучателя (например, многоэлементные излучатели), либо из-за возбуждения волн Лэмба в пьезокерамической пластине. Знание характера колебаний поверхности важно как само по себе, так и для точного предсказания излучаемых акустических полей в пространстве. Однако до сих пор нет надежных прямых методов для измерения колебаний поверхности в жидкости.

Данная работа посвящена разработке нового метода акустической голографии для восстановления колебаний источников и предсказания их полей, а также исследованию применимости существующего прямого метода лазерной виброметрии в жидкостях.

*Знание характера колебаний источников важно в следующих областях:*

- Исследование колебаний различных поверхностей
- Исследование поверхностных волн и мод колебаний
- Визуализация скрытых повреждений и неоднородностей
- Характеризация многоэлементных и других излучателей
- Создание излучателей с заранее заданными свойствами
- Гидролокация, определение характеристик источника звука
- Предсказание излучаемых акустических полей в пространстве

Пьезоэлектрические излучатели, в зависимости от областей их применения, сильно различаются по формам, размерам, резонансным частотам и способам изготовления. Простейшие излучатели делаются в форме плоских или вогнутых *пьезокерамических пластин*. Недостатком таких излучателей, как показано в этой работе, является наличие паразитных волн на их поверхности (волны Лэмба). Они рождаются на краях излучателя и сильно искажают основную поршневую моду колебаний. Из-за этих волн колебания излучателя становятся неравномерными, что может существенно сказаться на излучаемых полях. Простое предсказание колебаний поверхности и излучаемых полей становится, таким образом, невозможным, и для их изучения необходимо применять специальные методы.

*Пьезокомпозитные излучатели* специально разрабатываются для того, чтобы подавить паразитные волны на их поверхности и сделать их колебания более равномерными, более близкими к поршневым. Такие излучатели состоят из большого количества маленьких элементов различного размера, колеблющихся в одной фазе. Однако поверхностные волны в

них также существуют и, как показано в этой работе, из-за интерференции волн от отдельных элементов пьезокompозита могут возникать сложные дополнительные моды колебаний. Таким образом, изучение характера колебаний поверхности пьезокompозитных излучателей также является важным, особенно для производителей таких излучателей.

Более сложные источники ультразвука, такие как *многоэлементные излучатели и фазированные решетки*, изготавливаются для применений в медицине и других областях. Такие излучатели состоят из многих независимых элементов, каждый из которых может колебаться независимо. Полями таких излучателей можно управлять, подавая на их элементы сигналы со специально подобранными амплитудами и фазами. Как любая периодическая решетка из излучающих элементов, такие излучатели часто создают в пространстве дополнительные боковые лепестки и паразитные максимумы со значительной амплитудой. Это может быть очень опасно в медицинских применениях, так как может вызвать нежелательный перегрев и повреждение живой ткани. Колебания многоэлементных излучателей и их поля крайне сложны и нуждаются в тщательном изучении перед их практическим использованием.

*Знание излучаемых полей в пространстве важно в следующих областях:*

- Медицинская диагностика, ультразвуковая хирургия и терапия
- Дефектоскопия и неразрушающий контроль
- Ультразвуковая микроскопия
- Гидролокация

Знание создаваемых излучателями акустических полей может сильно повысить точность и пространственное разрешение в медицинской диагностике, микроскопии и других областях, которые используют ультразвук для получения информации о среде. В областях, которые используют ультразвук высокой интенсивности, особенно связанных со здоровьем человека, как например ультразвуковая хирургия и терапия, необходимо точно знать интенсивность и дозу ультразвука, а также размеры фокальной перетяжки. Знание пространственного распределения ультразвукового поля очень важно также для того, чтобы определять наличие и избегать появления в излучаемом поле дополнительных боковых лепестков, которые могут вызвать непредвиденный перегрев и повреждение здоровых тканей. Такие боковые лепестки часто появляются в полях, создаваемых медицинскими многоэлементными излучателями и фазированными решетками, и они также могут присутствовать в полях обычных пьезокерамических излучателей. Любая ошибка или

неточность в медицине связана с риском для здоровья пациента. Вот почему крайне важно развитие методов для точного предсказания ультразвуковых полей.

Существуют различные методы исследования колебаний поверхностей и предсказания их полей. Прямой *метод лазерной виброметрии* обладает высоким пространственным и временным разрешением при измерениях смещения и колебательной скорости поверхности в газах. Однако при измерениях в жидкостях сильное влияние на показания лазерного виброметра оказывает *акустооптическое взаимодействие*, связанное с зависимостью показателя преломления от плотности (давления). Колебания поверхности исследуемого источника создают в жидкости акустические волны, которые из-за эффекта акустооптического взаимодействия приводят к изменениям показателя преломления. Луч лазера, проходя через среду с переменным показателем преломления, приобретает дополнительный набег фаз, по величине сравнимый со сдвигом фаз, вызванным смещением исследуемой поверхности. Эта добавка может быть учтена и скорректирована лишь в простейших случаях. В данной работе подробно исследован характер искажений, вносимых акустооптическим взаимодействием, и доказано, что лазерный виброметр неприменим для измерений в жидкостях, за исключением отдельных случаев.

Существуют также *непрямые (косвенные) методы* исследования колебаний поверхностей. Колебания излучателя обычно рассчитываются на основе распределения давления, измеренного напротив изучаемой поверхности. Такой способ расчета имеет общее название – *акустическая голография*. Конкретные алгоритмы расчета колебаний излучателя на основе измеренного перед ним поля могут быть разными. Наиболее распространен *метод углового спектра*. Существуют также *метод эквивалентной фазированной решетки*, *метод суперпозиции гауссовых пучков* и другие техники. В данной работе описан созданный нами *метод обратного распространения (Back Propagation Method, BPM)*, основанный на интеграле Рэлея. Этот метод обладает рядом преимуществ перед другими техниками, главное из которых – возможность работы с источниками и поверхностями измерений произвольной формы.

### **Цели работы**

- Разработка нового метода акустической голографии для восстановления колебаний источников и предсказания их полей. Применение метода на практике и демонстрация его высокой точности и пространственного разрешения.

- Демонстрация возможности применения метода для исследования колебаний различных поверхностей, визуализации скрытых повреждений, характеристики многоэлементных излучателей и предсказания их полей.
- Выявление закономерностей влияния акустооптического взаимодействия на показания лазерного виброметра. Экспериментальное, теоретическое и численное обоснование того, что лазерный виброметр неприменим для исследования колебаний излучателей в жидкостях, за исключением отдельных выявленных случаев.
- Сравнение методов акустической голографии и лазерной виброметрии при измерениях колебаний реальных излучателей в различных режимах и средах.
- Демонстрация наличия сильных паразитных волн на поверхности излучателей. Экспериментальные доказательства неприменимости поршневой модели для предсказания полей реальных излучателей.
- Исследование колебаний и полей пьезокерамических и пьезокомпозитных излучателей различных форм и частот в различных средах. Исследование процессов генерации и эволюции волн Лэмба на поверхности излучателей в разных режимах.

#### **Научная новизна и практическая ценность работы**

- Разработан новый метод акустической голографии для восстановления колебаний источников и предсказания их полей – *Метод Обратного Распространения (Back Propagation Method, BPM)*, основанный на интеграле Рэлея. Его преимущества перед другими методами – возможность работы с поверхностями и излучателями произвольной формы, высокая точность и скорость расчетов, характеристика колебаний с точки зрения излучательной способности, применимость во многих областях (в акустике, медицине, аэроакустике, гидролокации, радиолокации), относительная простота и дешевизна.
- Метод впервые применен для исследования колебаний поверхностей, визуализации скрытых повреждений, характеристики многоэлементных излучателей и для предсказания акустических полей. Доказана его высокая точность и пространственное разрешение. Произведено сравнение методов акустической голографии и лазерной виброметрии.
- Впервые представлены комплексные (экспериментальные, теоретические и численные) доказательства неприменимости лазерного виброметра для исследования колебаний излучателей в жидкостях, за исключением отдельных выявленных случаев.

- Впервые комплексно (экспериментально, численно и теоретически) исследован точный характер искажений, обусловленных акустооптическим взаимодействием, при измерениях лазерным виброметром в жидкостях в различных режимах.
- Экспериментально исследованы процессы генерации и эволюции волн Лэмба на поверхностях разных типов излучателей в различных режимах. Обнаружен ряд новых явлений, эффектов и мод при колебаниях излучателей.

**Достоверность** результатов диссертации подтверждается большим количеством специально поставленных проверочных экспериментов, совпадением теоретических выводов с экспериментальными данными и результатами численного моделирования, использованием современного высокоточного экспериментального оборудования и обоснованных методов расчета.

### **Апробация работы**

Материалы диссертации докладывались на научных семинарах кафедры акустики и кафедры колебаний физического факультета МГУ; Национального Института Здоровья и Медицинских Исследований Франции (INSERM, г.Лион, Франция); Акустического института им. акад. Н.Н.Андреева (АКИН), Института Общей Физики Академии Наук (ИОФАН); а также на следующих конференциях, семинарах, встречах и симпозиумах:

- РАО, Российское Акустическое Общество – сессии 10, 11, 15, 16 (года 2000, 2001, 2004, 2005), Москва и Нижний Новгород, Россия;
- ISNA–16, International Symposium on Nonlinear Acoustics, 2002, Москва, Россия;
- ISTU–3, International Symposium on Therapeutic Ultrasound, 2003, Лион, Франция;
- IEEE, International Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control Joint 50th Anniversary Conference, 2004, Монреаль, Канада;
- RAS–SFA, Joint Workshop of Russian Acoustical Society (RAS) and French Acoustical Society (SFA), "High Intensity Acoustic Waves in Modern Technological and Medical Applications", 2005, Москва, Россия;
- "Ломоносов", Международная конференция студентов и аспирантов по фундаментальным Наукам, сессии 9, 11 (2002, 2004), Москва, Россия;
- "Волновые явления в нелинейных средах", Всероссийская школа-семинар – сессии 7, 8, 9 (2000, 2002, 2004), Красновидово, Россия;
- FPP, "Fundamental Problems of Physics", 2<sup>nd</sup> International Conference, 2000, Саратов, Россия.

## **Публикации**

Основные результаты изложены в 11 опубликованных работах, список которых приводится в конце автореферата.

## **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка цитируемой литературы, включающего 110 наименований. Общий объем работы составляет 123 страницы, включающие 47 рисунков.

## ***Содержание работы***

Данная работа посвящена разработке нового метода акустической голографии, сравнению его с методом лазерной виброметрии, выявлению характера акустооптических искажений в жидкостях, а также изучению колебаний различных пьезоэлектрических излучателей обоими методами.

Во **Введении** приводится обзор литературы и существующих достижений в области применения ультразвука в различных областях нашей жизни. Показана важность точного предсказания полей, излучаемых источниками ультразвука. Рассмотрены различные типы излучателей и показана важность знания характера колебаний их поверхности. Рассмотрены различные существующие методы исследования колебаний поверхности излучателей. Отдельно описан метод лазерной виброметрии (ЛВ), виды и характеристики лазерных виброметров и их применение. Описаны достоинства и недостатки прямого метода ЛВ по сравнению с косвенными методами, в частности, проблемы, возникающие при измерениях в жидкостях вследствие акустооптического взаимодействия. Рассмотрен метод обратного распространения, разработанный нами и описанный в диссертации. Описаны области применения метода, а также его достоинства и недостатки по сравнению с другими техниками.

Также во Введении рассмотрены цели диссертации, описана научная новизна работы, приведено краткое содержание глав, защищаемые положения и апробация диссертации.



**Глава 1** посвящена измерению колебаний излучателей *в воздухе* с помощью *лазерного виброметра (ЛВ)*.

В параграфе **1.1** описана экспериментальная установка, созданная для прямых измерений колебаний различных ультразвуковых излучателей в воздухе (ее схема аналогична представленной на Рис. 1). Рассмотрены отдельные части установки: лазерный виброметр, система позиционирования, осциллограф и генератор. Описаны типы и параметры излучателей, с которыми проводились эксперименты.

В параграфе **1.2** описаны два режима, в которых проводились измерения колебаний лазерным виброметром: *непрерывный режим* (с.w. regime) и *временной режим*. Также рассмотрены особенности проведения экспериментов в этих режимах.

В параграфе **1.3** приведены результаты измерений в воздухе колебаний нескольких пьезокерамических и пьезокомпозитных излучателей в непрерывном и импульсном режимах.

В пункте **1.3.1** описаны применяемые в диссертации способы представления экспериментальных результатов в виде двумерных графиков. Объяснено различие цветовых шкал в непрерывном и временном режимах. Описаны причины и преимущества относительности большинства результатов в данной работе, и способы их нормировки.

В пункте **1.3.2** приведены результаты измерений колебаний пьезокомпозитного излучателя в непрерывном режиме. Четко видна структура пьезокомпозитного материала и отдельные керамические элементы. Эксперимент показал, что колебания поверхности пьезокомпозитных излучателей довольно близки к равномерным (поршневым), если пренебречь тонкой структурой пьезокомпозитного материала (которая не излучает).

В пункте **1.3.3** приведены результаты измерений колебаний пьезокерамического излучателя во временном режиме. Эксперимент показал, что в начале колебаний на краях излучателя (а также на других неоднородностях) рождаются поверхностные волны Лэмба, которые далее распространяются к центру излучателя. В квазинепрерывном режиме колебаний волны Лэмба образуют кольцевую структуру стоячих волн. Измерены фазовая и групповая скорости волн Лэмба. В импульсном режиме колебаний излучателя кроме поршневой моды и быстрой волны с краев обнаружены также мощные медленные несимметричные волны. Они существуют на поверхности излучателя долгое время, в несколько десятков раз превышающее время затухания других мод колебаний.

В пункте **1.3.4** приведены результаты измерений колебаний пьезокомпозитного излучателя во временном режиме. Экспериментально показано, что в процессе колебаний каждый отдельный элемент пьезокомпозита порождает волну, и эти волны, интерферируя между собой, формируют волновой фронт, который распространяется по поверхности

излучателя внутрь и наружу от края. Показано, что в неоднородном пьезокомпозитном материале поверхностные волны распространяются на значительные расстояния (несколько десятков рядов элементов).

В пункте 1.3.5 объяснена неочевидная полярность внутреннего и наружного волновых фронтов поверхностных волн, обнаруженная в предыдущем пункте.

В пункте 1.3.6 приведены результаты исследования мод колебаний, образующихся при вибрации пьезокомпозитного излучателя в квазинепрерывном режиме. Исследование в непрерывном и временном режимах показало, что в результате интерференции волн от отдельных элементов пьезокомпозита возникают особые моды стоячих колебаний. Образуется прямоугольная неравномерная структура стоячих волн со средним периодом вдвое большим, чем период пьезокомпозитного материала (Рис. 4). Период этой структуры сравним с длиной волны в воде, поэтому наличие таких мод может сказаться на излучении пластины. Также показано, что элементы керамики могут влиять на колебания друг друга на значительных расстояниях.

В параграфе 1.4 приведены выводы к Главе 1.

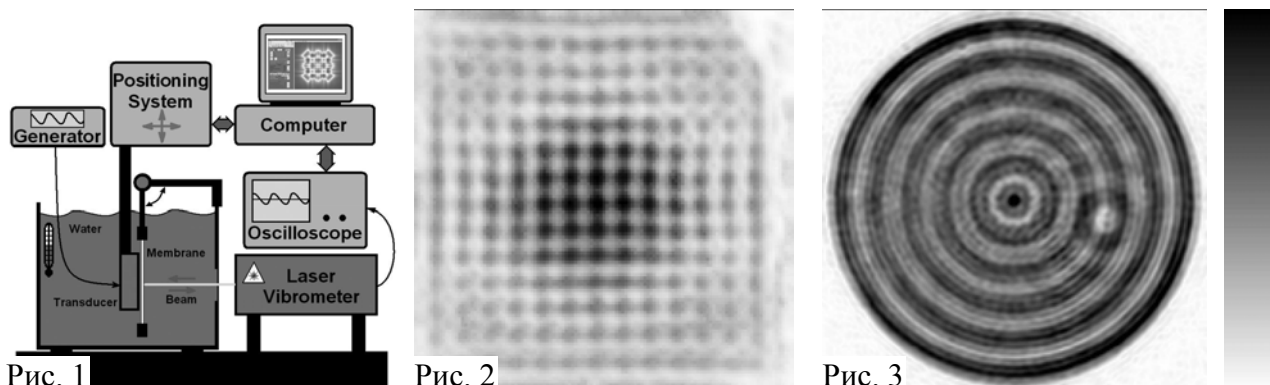


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для измерения смещения поверхности излучателя в жидкости с помощью лазерного виброметра.

Рис. 2. Стоячие волны, распространяющиеся в воде от краев излучателя (пунктир) и от других неоднородностей со скоростью звука в воде – результат искажений, вносимых акустооптическим взаимодействием при измерениях лазерным виброметром в жидкости.

Рис. 3. Стоячие поверхностные волны (волны Лэмба) в пьезокерамическом излучателе, измеренные методом акустической голографии в воде. Видны две различные моды.

**Глава 2** посвящена измерению колебаний излучателей *в жидкостях* с помощью *лазерного виброметра (ЛВ)*.

В параграфе 2.1 рассмотрены различия при измерениях с помощью лазерного виброметра в газах и жидкостях. Приведена теория акустооптического взаимодействия и его

влияния на показания лазерного виброметра в жидкости. Акустические волны в жидкости создают пространственно-временное распределение показателя преломления:  $n(\vec{r}, t) = n_0 + \gamma p(\vec{r}, t)$ , где  $p$  – акустическое давление и  $\gamma = dn/dp$  – акустооптический коэффициент. Луч лазера, проходя через среду с переменным показателем преломления, приобретает дополнительный набег фаз, который по величине того же порядка, что и сдвиг фаз, вызванный смещением измеряемой поверхности. Эта добавка может быть учтена в случае плоской волны. Поэтому часто полагают, что измерения в жидкости можно проводить так же, как и в вакууме. Но, как было показано, реальные волны от излучателей имеют сложную структуру, и поэтому предположение плоской волны в большинстве практических случаев не работает. В общем случае наблюдаемое смещение  $\xi_{набл}(t)$  (то есть смещение, которое лазерный виброметр, разработанный для измерений в вакууме, покажет в жидкости), выражается через истинное смещение  $\xi(t)$  следующей формулой:

$$\xi_{набл}(t) = n_0 \xi(t) - \gamma \int_0^L p(z, t) dz.$$

Таким образом, показания лазерного виброметра в жидкости зависят не только от действительного смещения поверхности, но также и от распределения акустического давления на всем пути лазерного луча.

В параграфе 2.2 приведены результаты численного моделирования показаний лазерного виброметра в жидкостях. Исследовано влияние акустооптического взаимодействия на показания лазерного виброметра. Выявлены типы и величина искажений, которые может вызывать акустооптическое взаимодействие.

В пункте 2.2.1 кратко описаны две техники, использованные для моделирования показаний лазерного виброметра в жидкостях: "медленная" и "быстрая" техники.

В пункте 2.2.2 приведены результаты численного моделирования показаний лазерного виброметра в непрерывном режиме. Показано, что за счет акустооптического взаимодействия показания ЛВ значительно отличаются от действительного распределения смещения. ЛВ показывает дополнительную прямоугольную равномерную структуру, пространственный период которой в точности равен длине волны в воде. Форма искажений близка к структуре стоячих поверхностных волн, поэтому их легко перепутать. Но природа этих структур различна: стоячие волны Лэмба образуются в результате интерференции поверхностных волн от краев излучателя, а показываемая ЛВ структура связана с интерференцией краевых волн в жидкости. Также проведено моделирование восстановления структуры колебаний поверхности с помощью метода акустической голографии (АГ).

Численный эксперимент показал, что акустическая голография предсказывает истинные колебания источника с высокой точностью.

В пункте **2.2.3** приведены результаты численного моделирования показаний лазерного виброметра во временном режиме. Рассмотрены показания ЛВ при колебаниях излучателя в цуговом режиме. Сначала, когда волна от излучателя плоская (*прямая волна*), показания ЛВ в жидкости легко пересчитываются в действительное смещение путем умножения на коэффициент. Однако в момент, когда цилиндрическая *краевая волна* в жидкости пересекает лазерный луч, возникают сильнейшие искажения в показаниях ЛВ. На графике зависимости наблюдаемого смещения от времени появляется дополнительная синусоидальная волна (цуг), которой нет на поверхности излучателя в действительности. Такие искажения вызваны приходом фронта краевой волны, которая распространяется со скоростью звука в жидкости. Таким образом, из-за акустооптического взаимодействия становятся видны акустические волны в жидкости. Показания ЛВ являются суммой действительного смещения поверхности и акустооптических искажений.

В параграфе **2.3** приведены результаты экспериментальных измерений колебаний ультразвуковых излучателей с помощью лазерного виброметра в жидкостях.

В пункте **2.3.1** рассмотрена экспериментальная установка для измерения смещения с помощью ЛВ в жидкостях (Рис. 1). Она аналогична установке для измерений в воздухе, но водонепроницаемые излучатели помещаются в кювету с жидкостью, и луч лазера проходит через специальное оптическое стекло. Описаны два способа закрепления отражающей мембраны, а также способы избегания переотражений акустических волн в жидкости.

В пункте **2.3.2** приведены результаты экспериментальных измерений колебаний пьезокомпозитного излучателя в непрерывном режиме с помощью ЛВ. Произведено сравнение трех измерений колебаний одного и того же излучателя – в воде и в воздухе с помощью метода ЛВ, а также в воде с помощью метода АГ. Показано, что при колебаниях в воздухе в непрерывном режиме образуется неравномерная структура стоячих волн с двойным периодом (как описано в пункте 1.3.6). В воде ЛВ показал похожую структуру, но с равномерным шагом, в точности равным длине волны в воде. Эта наблюдаемая при измерениях в воде структура является смесью двух различных прямоугольных структур с примерно одинаковым периодом. Первая структура неравномерна – это действительные моды колебаний пьезокомпозитного материала. Вторая – равномерная структура акустооптических искажений, вызванных интерференцией волн в воде, с шагом, равным длине волны в воде. Показано, что вторая структура преобладает, так как в результирующей структуре практически не заметно отклонений от равномерности. Метод АГ в жидкости дает

похожее, но сглаженное распределение. Пространственное разрешение АГ (порядка длины волны) в данном случае недостаточно, чтобы выявить тонкую структуру колебаний.

В пункте **2.3.3** приведены результаты экспериментальных измерений колебаний пьезокерамического излучателя в воде во временном режиме с помощью ЛВ. Показана зависимость наблюдаемого смещения поверхности от времени, измеренная в центральной точке квадратного пьезокерамического излучателя. Показано, что в момент прихода *поверхностных волн* с краев излучателя в точку измерений существенных колебаний не наблюдается. Однако в более поздний момент времени, когда *краевые волны в воде* пересекают лазерный луч, в показаниях ЛВ наблюдаются сильнейшие искажения, по амплитуде превосходящие изначальный сигнал. Это служит еще одним доказательством того, что ЛВ показывает именно волны в жидкости, а не реально существующие поверхностные волны в керамике.

В пункте **2.3.4** приведены результаты сравнения показаний ЛВ при измерениях в воздухе, воде и глицерине. Произведены пространственно-временные измерения колебаний излучателя в импульсном режиме. Использовался квадратный пьезокомпозитный излучатель, поверхностные волны в котором крайне слабы. При измерениях в воздухе наблюдались слабые поверхностные волны, распространяющиеся от краев излучателя по его поверхности наружу и внутрь со скоростью 2000 м/с. При измерениях в воде и глицерине наблюдались волны точно такой же формы, что и в воздухе, но распространяющиеся со скоростями 1480 м/с и 1900 м/с соответственно, что совпадает со скоростями звука в воде и глицерине (Рис. 5). К тому же амплитуда наблюдаемых волн в жидкости была значительно выше, чем при измерениях в воздухе. Проведенный эксперимент доказал, что ЛВ показывает именно краевые волны в жидкости, а не реально существующие поверхностные волны в излучателе. Изучено во времени образование фронта краевой волны в результате интерференции волн от отдельных рядов пьезокомпозитного материала. Эксперимент также показал, что волны в жидкости образуются не только от краев, но и от различных неоднородностей на поверхности излучателя, например, точек припайки и мелких частичек (Рис. 5, 6). Таким образом доказано, что неравномерные колебания излучателя в жидкости нельзя измерять напрямую с помощью ЛВ даже в самом начале колебательного процесса.

В пункте **2.3.5** приведены результаты измерения структуры стоячих волн в непрерывном режиме в воде и в воздухе. Стоячие волны Лэмба образуются в результате интерференции поверхностных волн, бегущих от противоположных краев излучателя. Поэтому пространственный период структуры стоячих волн определяется только формой излучателя и скоростью волн Лэмба в керамике, и не зависит от среды, в которую помещен

излучатель. Однако, как было показано в пункте 2.2.2, при измерениях в воде в непрерывном режиме ЛВ должен показывать дополнительную прямоугольную равномерную структуру, пространственный период которой в точности равен длине волны в воде. Эта структура появляется из-за искажений, вносимых акустооптическим взаимодействием. Измерения с помощью ЛВ в воздухе показали (Рис. 2), что стоячие волны при колебаниях квадратного излучателя в воздухе обладают ярко выраженной прямоугольной равномерной структурой с пространственным периодом 4,2 мм. Проведенные с помощью АГ измерения в воде показали, что стоячие волны на поверхности излучателя существуют также и в воде, обладают похожей структурой, и их пространственный период совпадает с периодом в воздухе. Однако структура, наблюдаемая в воде с помощью ЛВ, абсолютно другая и сложная – ее основной пространственный период равен 2,95 мм, что сильно отличается от периода структуры, полученной при измерениях в воздухе (4,2 мм). Более того, пространственный период, полученный в воде (2,95 мм), в точности совпадает с длиной волны в воде на используемой частоте. Этот эксперимент доказал, что структура стоячих волн Лэмба на поверхности данного излучателя действительно существует и имеет пространственный период 4,2 мм, одинаковый при колебаниях в воздухе и в воде (Рис. 2). Но показания лазерного виброметра в воде сильно искажены из-за акустооптического взаимодействия. Эти искажения так сильны, что настоящий период структуры колебаний поверхности (4,2 мм) почти не виден. Вместо него лазерный виброметр показывает структуру с другим периодом (2,95 мм), которая является смесью двух структур с разными периодами, причем паразитная структура краевых волн в жидкости преобладает.

В пункте 2.3.6 рассмотрены способы уменьшения искажений, вызванных акустооптическим взаимодействием, с помощью применения специальных численных коррекций. Рассмотрены попытки французских ученых теоретически учесть эффект акустооптического взаимодействия и скомпенсировать вносимые им искажения с помощью применения специального численного фильтрации. Однако авторы заключают, что поверхностные волны с фазовыми скоростями (для воды) меньше 1930 м/с (излучающие под углами более 50°) вообще не могут быть измерены с помощью ЛВ в воде. Другими словами, даже с применением процедуры фильтрации пространственное разрешение метода ЛВ в жидкости сильно ограничено. Для того чтобы получить действительное смещение определенной точки с помощью ЛВ в жидкости, вся поверхность излучателя должна быть тщательно обмерена ЛВ, и затем нужно использовать двумерный численный фильтр. Но такая процедура имеет множество недостатков, которые рассмотрены далее: 1. Метод ЛВ в жидкости становится *косвенным*, так как действительное смещение *рассчитывается* с

помощью решения обратной задачи на основе измерений во всех точках колеблющейся поверхности. 2. Метод критичен к количеству и точности экспериментальных данных. 3. Поверхностные волны с фазовыми скоростями меньше 1930 м/с (для воды) не могут быть измерены вообще. 4. Точность и пространственное разрешение ЛВ в жидкостях сильно ограничены и не превосходят точности не прямых методов, таких как наш новый метод акустической голографии, представленный в следующей Главе 3.

В параграфе 2.4 приведены выводы к Главе 2.

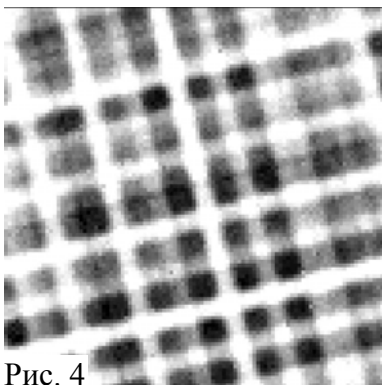


Рис. 4

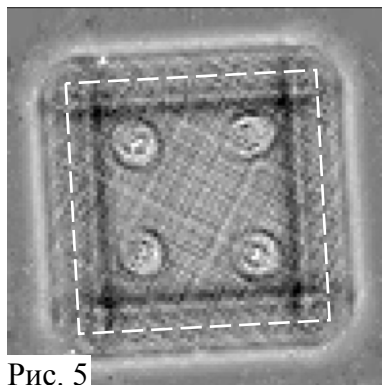


Рис. 5

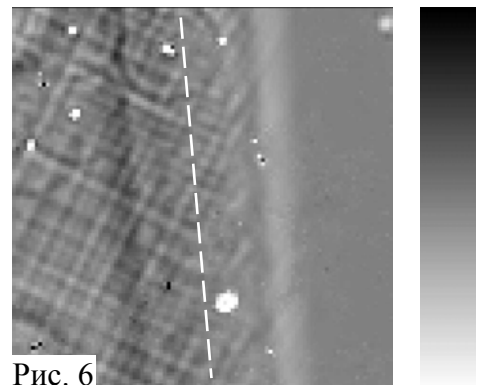


Рис. 6

Рис. 4. Моды, возникающие при колебаниях пьезокомпозитного излучателя в воздухе. Пространственный период структуры и размер ее элементов в 2 раза превышают соответствующие параметры реальной структуры пьезокомпозитного материала.

Рис. 5, 6. Краевые волны, распространяющиеся в воде от краев излучателя (пунктир) и от других неоднородностей (пузырьков, частичек и отдельных элементов пьезокомпозита) со скоростью звука в воде – результат искажений, вносимых акустооптическим взаимодействием при измерениях лазерным виброметром в жидкости.

**Глава 3** посвящена восстановлению колебаний излучателей и предсказанию их полей в жидкостях с помощью метода акустической голографии (АГ).

В параграфе 3.1 описан метод акустической голографии и рассмотрена теория разработанной в диссертации новой техники АГ – метода обратного распространения. Метод включает измерение амплитуды и фазы волны во многих точках контрольной плоскости перед излучателем, численное обращение волнового фронта во времени и расчет обратного распространения поля к источнику с использованием интеграла Рэлея. Возможность восстановления колебаний источника на основе излучаемых им полей следует из обратимости волнового уравнения во времени. Для восстановления достаточно измерить амплитуду и фазу поля во многих точках некой поверхности перед источником, такой, чтобы через нее проходила почти вся излученная энергия. Распределение нормальной

колебательной скорости  $V_n(\vec{r})$  на поверхности излучателя выражается через распределение давления  $P(\vec{r}')$  на плоскости  $\Sigma'$  перед ним следующим образом:

$$V_n(\vec{r}) = \int_{\Sigma'} P(\vec{r}') K(\vec{r}, \vec{r}') dS',$$

где  $K(\vec{r}, \vec{r}')$  – ядро, зависящее от пространственной конфигурации системы.

В параграфе **3.2** описаны способы численных расчетов для излучателей различной формы, используемые в работе. Приведены критерии и способы разбиения поверхностей измерения и восстановления на отдельные элементы для плоских и сферических, а также более сложных поверхностей. Рассмотрены особенности вычисления ядра  $K(\vec{r}, \vec{r}')$  для различных пространственных конфигураций системы.

В параграфе **3.3** приведены результаты экспериментального применения метода АГ.

В пункте **3.3.1** описана экспериментальная установка для измерения акустического давления, создаваемого излучателем в жидкости. Плоский или сфокусированный излучатель помещался в кювету с дегазированной водой. Игольчатый или другой гидрофон мог перемещаться перед излучателем с помощью системы микропозиционирования, которая управлялась с компьютера. На излучатель с генератора подавались длинные синусоидальные цуги. Сигналы от гидрофона измерялись с помощью цифрового осциллографа, обрабатывались и передавались на компьютер. Весь процесс измерений производился полностью автоматически под управлением компьютера и специальной программы. Также подробно описаны отдельные составляющие установки, режимы измерений, используемые методы повышения точности измерений, выбор системы координат и способы нахождения акустической оси излучателя.

В пункте **3.3.2** описан порядок проведения экспериментов с применением метода АГ. Сначала с помощью специального алгоритма определяются наилучшие параметры поверхности измерений. Затем находится акустическая ось излучателя. Далее измеряются амплитуда и фаза давления на выбранной поверхности перед излучателем. Потом с помощью специальной расчетной программы восстанавливается распределение нормальной колебательной скорости на поверхности излучателя. Полученное распределение используется для предсказания полей в пространстве. Также при необходимости сравниваются распределения скорости, восстановленные с различных плоскостей измерений, а предсказания полей в пространстве с помощью метода АГ и поршневой модели сравниваются с экспериментальными данными.



В пункте **3.3.3** описан алгоритм нахождения оптимальных параметров контрольной плоскости (поверхности измерений). Параметрами плоскости являются ее положение, размер и количество точек измерений. Для нахождения оптимальных параметров из поршневого распределения скорости на излучателе рассчитывается давление на плоскости перед ним, затем с этой плоскости восстанавливается распределение скорости на излучателе и сравнивается с изначальным поршневым. Параметры плоскости подбираются так, чтобы восстановленное распределение скорости было как можно более равномерным. Приводятся также результаты численного исследования для оптимального выбора параметров. Описано, где лучше располагать плоскость измерений и как выбирать ее параметры для различных излучателей.

В пункте **3.3.4** в качестве примера приведено экспериментально измеренное двумерное распределение акустического давления перед фокусирующим излучателем, которое использовалось в следующем пункте для расчета колебательной скорости.

В пункте **3.3.5** приведен пример восстановления распределение нормальной колебательной скорости на поверхности излучателя на основе измеренного давления. На полученном распределении видна кольцевая структура стоячих волн Лэмба (подобная изображенной на Рис. 3). Приведено несколько примеров качественного и некачественного восстановления, описаны проблемы, возникающие при расчете скорости, и способы их избегания.

В пункте **3.3.6** приведены экспериментальные доказательства точности и устойчивости метода восстановления. Приведены распределения скорости, рассчитанные с различных плоскостей перед излучателем. Показано, что при правильном выборе параметров измерений восстановленное распределение скорости получается практически одинаковым при расчете с различных плоскостей.

В параграфе **3.4** описано предсказание полей в пространстве с помощью метода АГ на основе восстановленного распределения колебательной скорости на поверхности излучателя. Приводятся результаты ряда экспериментов, подтверждающих высокую точность метода АГ. Приведены результаты предсказания полей с помощью метода АГ, а также на основе поршневой модели, в сравнении с экспериментально измеренным давлением. Эксперименты с фокусированными пьезокерамическими излучателями показали, что метод АГ позволяет предсказывать поля излучателя в пространстве с высокой точностью и пространственным разрешением, как качественно, так и количественно. В частности, метод точно предсказывает несимметричные особенности поля, а также особенности, связанные с наличием волн Лэмба на поверхности излучателя. Приводятся результаты экспериментов по

предсказанию давления на различных плоскостях перед излучателем ( $XY$  и  $XZ$ ), на акустической оси ( $Z$ ), а также пример расчета вектора потока энергии  $\vec{I} = \langle p\vec{V} \rangle$  в пространстве перед фокусирующим излучателем. Все эксперименты подтверждают высокую точность предсказания полей с помощью метода АГ.

В параграфе **3.5** приведены результаты сравнения методов акустической голографии и лазерной виброметрии. Колебания пьезокомпозитного квадратного излучателя были тщательно исследованы с помощью метода АГ в воде и метода ЛВ в воде и в воздухе. Показано, что метод ЛВ идеален в газах и вакууме и имеет очень высокую точность и пространственное разрешение. Однако в воде, как было доказано в главе 2 диссертации, метод ЛВ дает сильно искаженные результаты, из которых в общем случае нельзя получить истинное смещение. Высокое разрешение прямого метода ЛВ в воде – лишь кажущееся. Показано также, что косвенный метод АГ в воде имеет ограниченное пространственное разрешение порядка длины волны, и поэтому не может предсказать тонкую структуру пьезокомпозита. Однако АГ точно характеризует колебания поверхности с точки зрения излучающей способности, и позволяет точно предсказывать поля в пространстве.

В параграфе **3.6** рассмотрены применения метода акустической голографии. В автореферате возможные применения метода АГ описаны в разделе "Актуальность темы". В следующих пунктах приводятся результаты экспериментальной проверки работоспособности метода для некоторых из описанных применений.

В пункте **3.6.1** приведены результаты эксперимента по исследованию стоячих волн Лэмба. Колебания плоского пьезокерамического излучателя были тщательно исследованы с помощью АГ в воде. На полученном двумерном распределении колебательной скорости (Рис. 3) четко видны две различные моды поверхностных волн Лэмба с пространственными периодами 8.8 мм и 2 мм, образующих кольцевую структуру стоячих волн с пиком в центре.

В пункте **3.6.2** приведены результаты эксперимента, который наглядно доказывает важность исследования колебаний поверхности и ее излучения. Были исследованы колебания и поля трех излучателей одинаковой формы и размера ( $D=6$  см  $F=7$  см), но с различной резонансной частотой. Показано, что колебания и поля этих практически одинаковых излучателей имеют капитальные различия, и непредсказуемы заранее без соответствующего исследования. Этим доказана важность проведения таких исследований.

В пункте **3.6.3** приведены результаты экспериментов по исследованию неоднородностей поверхности излучателя. На поверхности двух различных излучателей были наклеены буквы из пластилина (Рис. 7а). Пластилин поглощает акустические волны, а

также влияет на колебания излучателя. Показано, что при восстановлении колебательной скорости буквы четко видны на распределении (Рис. 7b). Эксперименты также показали, что метод АГ одинаково хорошо применим к плоским и фокусирующим излучателям и работает в широком диапазоне частот.

В пункте 3.6.4 приведены результаты экспериментов для демонстрации возможностей метода АГ по визуализации скрытых повреждений или неоднородностей поверхности излучателя. Представлены восстановленные распределения колебательной скорости на поверхностях двух излучателей с различными повреждениями. Показано, что излучатель с пузырьком воздуха под согласующим слоем (Рис. 8a) колеблется без изменений, однако пузырек воздуха играет роль непроходимого барьера для акустических волн, поэтому целый сегмент излучателя совсем не излучает в воду (Рис. 8b). Другой излучатель, расколотый и склеенный проводящим клеем (Рис. 9a), колеблется в целом равномерно, однако на краях расколов рождаются волны Лэмба, которые участвуют в формировании картины стоячих волн наряду с волнами от краев излучателя (Рис. 9b).

В параграфе 3.7 приведены выводы к Главе 3.

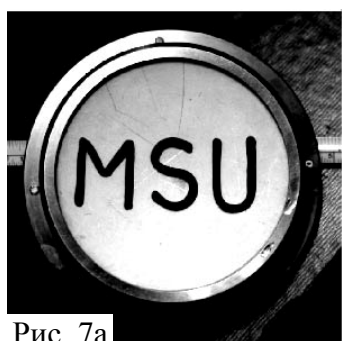


Рис. 7a

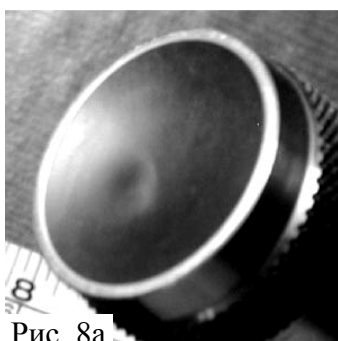


Рис. 8a

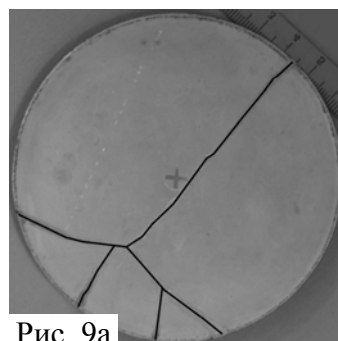


Рис. 9a

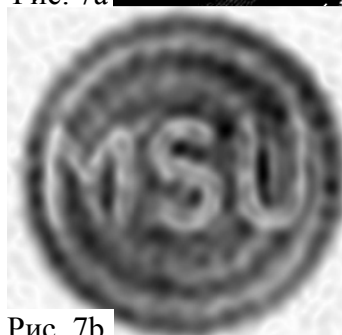


Рис. 7b

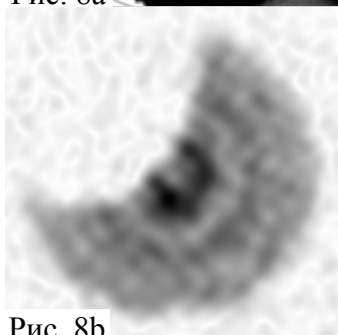


Рис. 8b

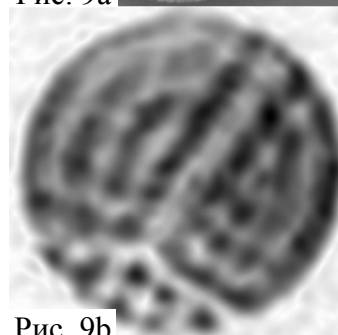


Рис. 9b

Экспериментальная демонстрация возможностей метода акустической голографии по визуализации скрытых повреждений или неоднородностей на поверхности излучателя. Верхний ряд – фотографии излучателей, нижний – восстановленная скорость колебаний.  
 Рис. 7. Излучатель с наклеенными буквами из пластилина, поглощающего волны.  
 Рис. 8. Излучатель со вздувшимся согласующим слоем. Пузырек не пропускает волны.  
 Рис. 9. Расколотый излучатель. Стоячие волны между краями излучателя и расколами.

## **Основные результаты, выносимые на защиту**

- Разработан новый метод акустической голографии для восстановления колебаний источников и предсказания их полей – *метод обратного распространения (ВРМ)*, основанный на интеграле Рэлея. Показано, что предложенный метод обладает высокой точностью и пространственным разрешением порядка длины волны, и применим для исследования колебаний поверхностей, визуализации скрытых повреждений, характеристики многоэлементных излучателей и для предсказания их полей.
- Метод акустической голографии успешно применен для исследования поверхностных волн, для визуализации скрытых повреждений и неоднородностей, для выявления характера колебаний многоэлементных излучателей и для предсказания излучаемых ими полей. С помощью разработанного метода исследованы колебания и поля множества излучателей различных типов, форм и размеров в широком диапазоне частот.
- Продемонстрировано, что поверхностные волны искажают колебания пьезоэлектрических излучателей и могут образовывать дополнительные моды колебаний, которые существенно искажают создаваемые поля. Исследован характер колебаний поверхности пьезокомпозитных излучателей и показано, что распределение скорости поверхности в них достаточно близко к равномерному (не считая микроструктуры), т.е. применима поршневая модель. Однако могут образовываться крупномасштабные моды колебаний.
- Показано, что метод лазерной виброметрии неприменим для прямых измерений смещения поверхности излучателей в жидкостях, за исключением отдельных случаев. Видимое смещение поверхности, даваемое лазерным виброметром, значительно отличается от действительного смещения, из-за искажений, вызванных акустооптическим взаимодействием.
- Показания лазерного виброметра в выделенной точке поверхности определяются не только колебанием в этой точке, но и колебаниями других точек поверхности, волны от которых в воде достигают пробного лазерного луча. Соответствующие искажения имеют характер волн, распространяющихся от краев излучателя и прочих неоднородностей со скоростью звука в жидкости.

## **Список работ, опубликованных по теме диссертации**

1. Сапожников О.А., Пищальников Ю.А., Морозов А.В. Восстановление распределения нормальной скорости на поверхности ультразвукового излучателя на основе распределения акустического давления вдоль контрольной плоскости. Акустический журнал, 2003, Т. 49, № 3, с. 416-424.
2. Morozov A.V., Pishchalnikov Yu.A., Sapozhnikov O.A. Method of measurement of vibrational velocity on ultrasound source surface: numeric analysis of accuracy. Physics of Vibrations, 2002, Vol. 10, No. 2, pp 93-99.
3. Андреев В.Г., Ведерников А.В., Морозов А.В., Хохлова В.А. Контроль изменения температуры в фокальной области ультразвукового излучателя. Акустический журнал, 2006, Т. 52, № 2, с. 149-155.
4. Морозов А.В., Катиньоль Д., Сапожников О.А. Исследование колебаний поверхности ультразвуковых излучателей: сравнение методов лазерной виброметрии и акустической голографии. Труды XV сессии РАО, 2004, Т. 2, с. 21-25.
5. Смагин М.А., Морозов А.В., Сапожников О.А. Исследование структуры акустического поля многоэлементного медицинского акустического датчика. Труды XV сессии РАО, 2004, Т. 3, с. 74-76.
6. Морозов А.В., Пищальников Ю.А., Сапожников О.А. Расчет колебательной скорости поверхности ультразвукового излучателя на основе распределения акустического давления на расположенной перед ним плоскости: численный анализ точности метода. Труды XI сессии РАО, 2001, Т. 2, с. 178-181.
7. Морозов А.В., Пищальников Ю.А., Сапожников О.А. Восстановление распределения нормальной скорости на поверхности ультразвукового излучателя на основе распределения акустического давления вдоль контрольной плоскости. Труды X сессии РАО, 2000, Т. 1, с. 187-190.
8. Sapozhnikov O.A., Morozov A.V., Cathignol D. Piezoelectric transducer surface vibration characterization using acoustic holography and laser vibrometry. Proc. IEEE Int. Ultrason. and UFFC 50th Anniv. Joint Conf., 2004, pp 161-164.
9. Morozov A.V., Pishchalnikov Yu.A., Cathignol D., Sapozhnikov O.A. Improved prediction of acoustic pressure and heat sources generated by therapeutic ultrasound transducers. Proc. ISTU-3, 3rd Int. Symp. on Therapeutic Ultras., 2003, pp 296-301.

10. Vedernikov A.V., Morozov A.V., Averianov M.V., Khokhlova V.A., Andreev V.G. Indirect temperature measurement in a focal zone of ultrasonic transducer. Proc. ISTU-3, 3rd Int. Symp. on Therapeutic Ultrasound, 2003, pp 217-223.
11. Sapozhnikov O.A., Morozov A.V., Ponomarev A.E., Smagin M.A. Characterization of therapeutic and diagnostic ultrasound sources using acoustic holography and optical schlieren method. Proc. Int. Symp. "Topical Problems of Nonlinear Wave Physics", 2005, pp. 91-92.