

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. Ломоносова

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

На правах рукописи

УДК 534.2

Карабутов Александр Александрович

**АКУСТИЧЕСКИЕ ИМПУЛЬСЫ В СЛОИСТЫХ СРЕДАХ:
СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И
ПРИМЕНЕНИЕ В ДИАГНОСТИКЕ МАТЕРИАЛОВ**

Специальность: 01.04.06 – акустика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва - 2013

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,
доцент Волошинов Виталий Борисович

Ведущая организация: Акустический институт
имени академика Н.Н. Андреева

Защита состоится 12 декабря 2013 года в 17-30 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
им. Р.В. Хохлова.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета
Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Автореферат разослан 11 ноября 2013 года.

Учёный секретарь
Диссертационного совета Д.501.001.67
кандидат физ.-мат. наук, доцент

А.Ф. Королёв

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Исследования акустических волн в слоистых структурах проводятся на протяжении достаточно длительного времени. Интерес к соответствующим явлениям обусловлен тем, что такие структуры широко распространены: от искусственных конструкций типа фильтров с периодической структурой до естественных сред, таких как атмосфера или океан, которые также можно описать слоисто-неоднородной моделью. Поэтому изучение свойств волн в слоистых средах, материалах и конструкциях до сих пор остаётся актуальной научной и технической проблемой. Интерес представляют как выявление вызванных слоистостью особенностей распространения упругих волн, так и использование волн для получения информации о структуре и свойствах этих сред.

Волновые процессы различной природы (например, акустические и электромагнитные) подчиняются ряду универсальных закономерностей и математически во многом описываются одинаково. Эта общность проявляется, в частности, и при распространении волн в неоднородных средах. Важным их классом являются слоистые структуры, которые характеризуются изменением параметров лишь в одном направлении. В общем случае волны могут распространяться как вдоль этого направления, так и под углом к нему. Сами слои могут быть как однородными, так и неоднородными, в том числе анизотропными. Класс соответствующих задач, относящихся к электромагнитным волнам, широк. Одним из примеров является дифракция рентгеновских лучей в кристаллах, выступающих для них естественной периодической средой. В случае оптического излучения похожих эффектов можно добиться, создавая искусственную регулярную слоистую структуру, к

примеру $\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. Подобные среды применяются для пространственной и частотной фильтрации световых волн. Другим известным примером являются многослойные диэлектрические покрытия, используемые для снижения или повышения коэффициента отражения света от поверхностей линз и зеркал. Для создания в среде периодических неоднородностей можно изменять в ней коэффициент преломления путём какого-либо внешнего воздействия. Для световых волн этого можно добиться за счёт акустооптического эффекта, пропуская свет через распространяющуюся в той же среде акустическую волну. Соответствующие задачи решаются в акустооптике. Немало подобных примеров имеется и для акустических волн. Периодические структуры используются для создания фильтров на поверхностных акустических волнах (ПАВ). Для возбуждения ПАВ применяются встречно-штыревые преобразователи. Задавая различные толщины электродов и расстояния между ними, можно сконструировать фильтр с требуемым откликом. Слоисто-неоднородные модели пригодны и для описания распространения акустических волн в природных средах, характеризующихся большими масштабами. Например, в задачах геологоразведки и сейсмографии интерес представляют упругие волны в слоисто-неоднородных твёрдых пластах. В медицинской акустике ультразвуковые волны используются для интроскопии внутренних органов. При этом волны пропускаются через кожный покров, который является средой с параметрами, плавно меняющимися вдоль одного направления. Отдельной важной областью применения ультразвука является неразрушающий контроль. В промышленном производстве все большее распространение получают слоистые композитные материалы. Они могут быть изготовлены из различных компонентов: металлов, полимеров, стеклотканей и т.п. Как правило, такие материалы используют в тех случаях, когда необходимо получить высокую механическую или термическую прочность вдоль определённых направлений. Подобные проблемы решаются, например, в авиации и космической технике. Для укрепления стандартных материалов всё

чаще используются тонкие слоистые покрытия. Они позволяют получить материалы с широким диапазоном механических и теплофизических свойств и значительно повысить прочность изделий при незначительном увеличении веса.

Несмотря на то, что слоистые среды встречаются в самых разных областях науки и техники, основные законы распространения волн в них, по сути, практически одинаковы. Используя эту универсальность, можно многое узнать о закономерностях распространения волн определённого вида, проводя эксперименты с волнами другой природы в аналогичных (в смысле влияния на волны) условиях. Изучение такого рода аналогов может оказаться полезным, как для практических приложений, так и для достижения понимания сложных явлений на основе излучения более простых моделей.

В большинстве из упомянутых выше задач о распространении волн в слоисто-неоднородных средах используются монохроматические или квазимонохроматические сигналы. Гораздо меньше проведено исследований с использованием импульсных возмущений. Для импульсных сигналов, частотный спектр которых широк, появляются новые особенности. Особый интерес представляют короткие видеоимпульсы, длительность которых меньше времени прохождения звука через характерный масштаб неоднородности слоистой среды. Подобные звуковые импульсы, например, могут быть возбуждены оптико-акустическим способом, путём поглощения коротких лазерных импульсов. Использование таких сигналов весьма перспективно для диагностики материалов, но многие потенциальные возможности их практического применения пока в полной мере не раскрыты и не исследованы.

Цели и задачи диссертационной работы

В соответствии с изложенным, основной целью диссертационной работы ставилось теоретическое и экспериментальное исследование особенностей распространения акустических импульсов в слоистых структурах и их

использование в диагностике материалов. Для достижения поставленной цели было намечено решение следующих практически значимых задач:

1. Экспериментальное исследование акустического аналога осцилляций Блоха при прохождении акустического импульса через многослойную квазипериодическую структуру.
2. Разработка методики измерения волнового сопротивления элементов слоистой структуры с помощью оптико-акустических сигналов.
3. Изучение возможности обнаружения расслоений в плоскостойком композитном материале на основе анализа отражений коротких оптико-акустических сигналов.
4. Создание фокусирующего оптико-акустического источника широкополосных импульсов для измерения рельефа поверхности твердотельных образцов, помещённых в иммерсионную жидкость.
5. Использование фокусированных оптико-акустических импульсов для виброметрии твердотельных пластин, помещённых в жидкость.
6. Наблюдение фазовой структуры поля отражённых волн при падении ультразвукового пучка на границу слоёв «жидкость-твёрдое тело» под углом Рэлея.
7. Экспериментальная реализация условий возбуждения под углом Рэлея «втекающей» неоднородной волны на границе твёрдого тела с клиновидным слоем жидкости.

Научная новизна работы

1. Экспериментально реализован режим распространения акустических импульсов в слоистой среде, позволяющий наблюдать акустический аналог явления осцилляций Блоха, известного в физике твёрдого тела.
2. Предложен новый метод анализа оптико-акустических сигналов, позволяющий определить волновое сопротивление элементов слоистой структуры и обнаружить расслоение в ней.

3. Создан фокусирующий оптико-акустический излучатель коротких импульсов для измерения рельефа поверхности твердотельных образцов, помещённых в жидкость.
4. Проведено экспериментальное наблюдение тонкой структуры акустического пучка, отражённого от границы «жидкость-твёрдое тело» при падении под углом Рэлея.
5. Экспериментально реализовано возбуждение новой граничной моды, соответствующей растущей поверхностной волне на границе раздела «жидкость-твёрдое тело».

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

Научная и практическая значимость работы

1. Экспериментальная реализация акустического аналога осцилляций Блоха подтверждает универсальность этого явления для волновых процессов разной природы.
2. Разработанная методика измерения акустического волнового сопротивления элементов слоистой структуры перспективна для использования в материаловедении многослойных композитных материалов и покрытий.
3. Использование фокусированных оптико-акустических сигналов для измерения смещения отражающей поверхности позволяет исследовать вибрации твердотельных образцов в оптически непрозрачных и мутных средах, что полезно для решения задач неразрушающего контроля.
4. Применение фокусированных акустических импульсов субмикросекундной длительности с близким к гауссовскому профилем

позволяет провести профилометрию поверхности объектов с точностью по высоте до нескольких микрон, что представляет интерес в сфере неразрушающего контроля.

5. Реализованный способ возбуждения «втекающей» акустической волны демонстрирует возможность сужения волновых пучков при отражении от плоской границы раздела, что может быть полезно для создания коллимированных пучков высокой интенсивности для различных научных и практических целей.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Акустический аналог осцилляций Блоха может быть экспериментально реализован при прохождении ультразвукового импульса через плоскостойкую среду, толщины слоёв которой изменяются обратно пропорционально их номеру.
2. Эхо-импульсный метод с использованием коротких монополярных оптико-акустических импульсов позволяет измерить акустические волновые сопротивления слоёв кусочно-неоднородной плоскостойкой среды, в том числе при наличии в ней высокочастотного поглощения.
3. Для поиска расслоения в многослойной структуре оптико-акустическим методом целесообразно использовать не отражённый сигнал, а его временную первообразную, монотонный характер убывания которой свидетельствует о наличии абсолютно мягкой границы.
4. Разработанный фокусирующий оптико-акустический преобразователь позволяет осуществить акустическую виброметрию объектов, погружённых в жидкость, в диапазоне частот от 0.5 до 500 Гц и виброскоростей от 3 мкм/с до 8 м/с.
5. Использование специальной конфигурации акустического пучка даёт возможность реализовать режим «втекающей» волны, позволяющий добиться уменьшения ширины акустического пучка при его отражении от границы раздела «жидкость-твёрдое тело» под углом Рэлея.

Апробация работы

Вошедшие в диссертацию материалы докладывались на Международной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2006» (Москва), X Всероссийской школе-семинаре «Волновые явления в неоднородных средах» (2006 г., Звенигород), XIX сессии Российского акустического общества (2007 г., Нижний Новгород), Международном симпозиуме по ультразвуку IEEE IUS 2007 (Нью-Йорк, США), Международном симпозиуме по неразрушающему контролю «NDT in Progress V» (2009 г., Брно, Чехия), Международном симпозиуме по ультразвуку IEEE IUS 2009 (Рим, Италия), XXII сессии Российского акустического общества (2010 г., Москва), II Международном симпозиуме по лазерному ультразвуку LU-2010 (Бордо, Франция), XII Всероссийской школе-семинаре «Волновые явления в неоднородных средах» (2010 г., Звенигород), X Европейской конференции по неразрушающему контролю ECNDT-2010 (Москва) и Симпозиуме по неразрушающему контролю «NDT in Progress VI» (2011 г., Прага, Чехия).

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 08-02-00368 и 11-02 01189, МНТЦ 3691 и стипендии Американского акустического общества для аспирантов.

Публикации

Основные результаты диссертации изложены в 15-ти печатных работах. Из них 3 статьи в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК [1,3,8], и 12 статей в сборниках трудов конференций. Список публикаций приведён в конце автореферата.

Личный вклад автора

Все материалы, вошедшие в данную диссертационную работу, подготовлены либо лично автором, либо совместно с соавторами работ, опубликованных по теме диссертации.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из общего вводного раздела, четырёх глав и Заключения. Каждая глава состоит из короткого введения и выводов. Список цитируемой литературы содержит 122 наименования, общий объём работы составляет 116 страниц текста, включая 52 рисунка.

Содержание работы

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

Первая глава посвящена экспериментальному наблюдению акустического аналога явления осцилляций Блоха. Основной идеей является использование слоистой структуры, состоящей из стеклянных пластин и воды между ними, в качестве «сверхрешётки». Теоретически рассматривается распространение цуга акустических волн в слоистой структуре для получения временной формы прошедшего сигнала. Помимо этого анализируются зависимости параметров полосы пропускания (ширина, количество пиков и высота промежутков между ними) от отношения акустических импедансов твёрдых и жидких слоёв. Также показано, что внесение возмущения в периодичность структуры приводит к эффекту, аналогичному приложению электрического поля к сверхрешётке: расхождению эквидистантных линий пропускания, так называемой «лестнице Ванье-Штарка», делокализации энергии акустических волн внутри слоистой структуры. Это возмущение заключается в изменении толщин жидких слоёв в зависимости от номера слоя таким образом, что разность обратных толщин (γ) соседних жидких слоёв остаётся постоянной. Параметр γ является аналогом напряжённости электрического поля. В результате моделирования показано, как зависит спектр пропускания от «внешнего поля» (т.е. от γ). На основе полученных результатов была выбрана область изменения градиента обратных толщин γ и диапазон

частот акустических волн (от 0.8 до 1 МГц), для которых аналогия верна. На рис. 1 приведена схема экспериментальной установки. Форма излучаемого сигнала в цифровом виде формировалась на компьютере (1) и передавалась в цифровой генератор (2). С него сигнал в аналоговом виде поступал в пьезоэлектрический преобразователь (3), который вместе с исследуемой структурой (4) находился в бассейне с водой (5). Акустические волны, возбуждаемые преобразователем, распространялись в воде, проходили сквозь слоистую структуру, вновь распространялись в воде и попадали на приёмный преобразователь. Принятый сигнал в дальнейшем поступал на цифровой осциллограф (6), а от него передавался в компьютер для записи и обработки. Слоистая структура представляла собой погружённую в воду конструкцию из шести пластин, расположенных параллельно друг другу. Пластины были изготовлены из стекла и имели форму квадрата со стороной 4 см. Толщины пластин измерялись с помощью цифрового микрометра. Разброс в разных точках пластин не превышал 8 мкм, т.е. относительные изменения толщины для каждой пластины находились в пределах 0.5%. Скорость звука в стекле измерялась при комнатной температуре эхо-импульсным методом с использованием коротких сигналов, возбуждённых оптико-акустическим

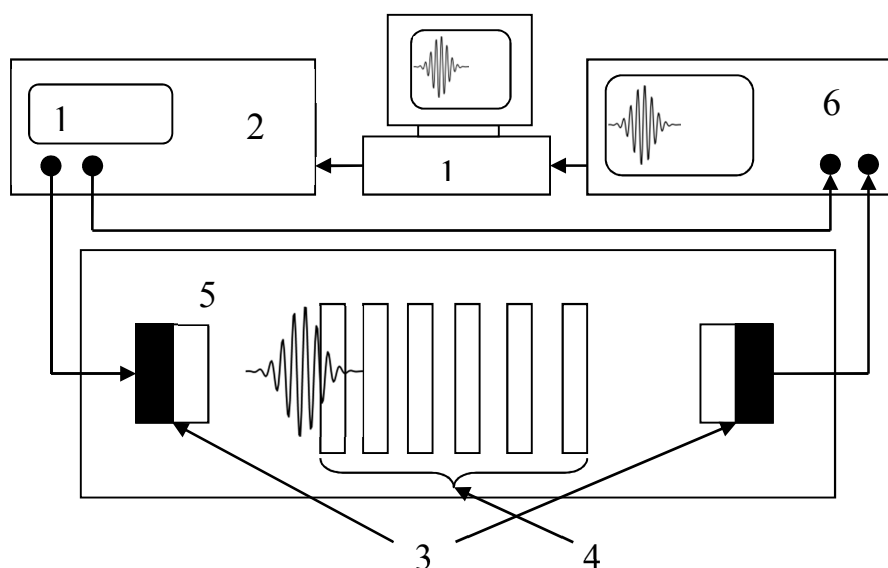


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 – компьютер, 2 – генератор, 3 - пьезопреобразователи, 4 – слоистая структура, 5 – ванна с водой, 6 – осциллограф

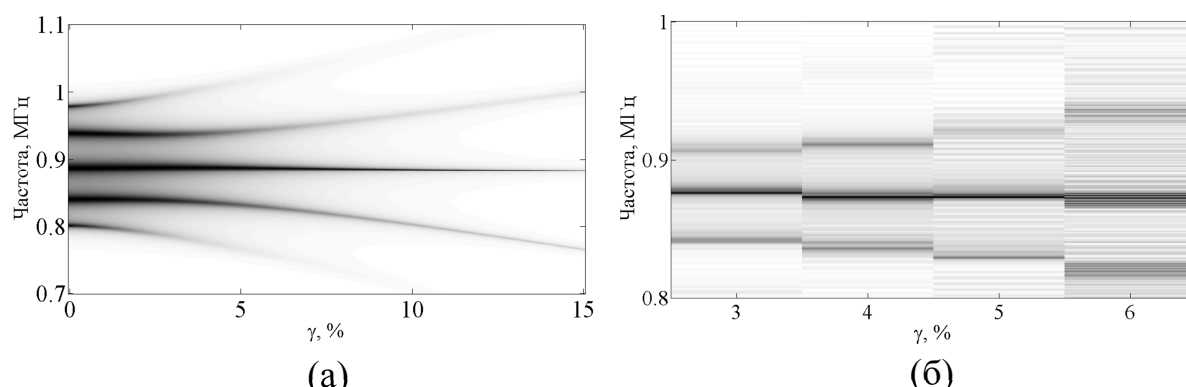


Рис. 2. Зависимость коэффициента пропускания слоистой структуры от частоты (по ординате) и градиента обратных толщин жидких слоёв (по абсциссе) в случае численного моделирования (а) и измеренные экспериментально (б). Значение коэффициента представлено градацией серого от белого (0) до чёрного (1) цвета

способом. Плотность стекла определялась путем взвешивания и измерения размеров образцов; она составила $(2503 \pm 25) \text{ кг/м}^3$. Это значение хорошо согласуется с табличным значением для натриевого стекла. В качестве излучающего и приёмного преобразователей были использованы два одинаковых широкополосных преобразователя с центральной частотой около 1 МГц и диаметром 38 мм (модель V392-SU, Olympus, США). Экспериментально была измерена полоса пропускания и оценена дифракционная расходимость. В области частот от 0.8 до 1 МГц частотная характеристика преобразователя имела незначительное уменьшение, что гарантировало корректное измерение формы акустических сигналов. На рис. 2(а) приведены результаты моделирования функции пропускания слоистой структуры для широкого диапазона значений «внешнего поля». От 0% до 3% пики пропускания не смещаются, после 3% они начинают разбегаться, что как раз и соответствует поведению «лестницы Ванье-Штарка» для различных значений электрического поля. Экспериментальные результаты изображены на рис. 2(б). Они демонстрируют линейное увеличение разностной частоты между пиками с ростом γ , аналогично тому, как меняется частота осцилляций Блоха от величины приложенного электрического поля. Для тех же значений γ были измерены и временные формы сигналов, демонстрирующие акустический аналог осцилляций Блоха. На рис. 3б приведены результаты для $\gamma = 3, 5, 6\%$. В

верхней части изображен зондирующий импульс. Для сравнения на рис. 3а приведены результаты моделирования при тех же $\gamma = 3, 5, 6 \%$.

В первой главе экспериментально продемонстрировано, что слоистая структура, состоящая из стеклянных и жидких пластин, представляет собой аналог сверхрешётки, а частота осцилляций огибающей прошедшего сигнала линейным образом зависит от градиента обратных толщин жидких слоёв (γ) так же, как частота осцилляций Блоха зависит от величины приложенного напряжения. Результаты первой главы опубликованы в статьях [1, 2].

Параметры слоистой структуры заранее не всегда известны, как это было в первой главе. Актуальной является и обратная задача: определить упругие характеристики каждого элемента среды. Она ставится в томографии. Для её решения объект облучается со всех сторон, а рассеянное излучение записывается и обрабатывается. Из-за того, что эта задача изначально поставлена некорректно, для её решения приходится использовать регуляризацию решения.

Во второй главе предлагается альтернативный способ восстановления параметров слоистой структуры: по отражению короткого оптико-акустического (ОА) импульса от границ элементов структуры. На рис. 4 приведена схема ОА преобразователя (0, 2, 3, 4), примыкающего к слоистой структуре (1). Лазерный импульс падает на ОА генератор (0) и возбуждает две

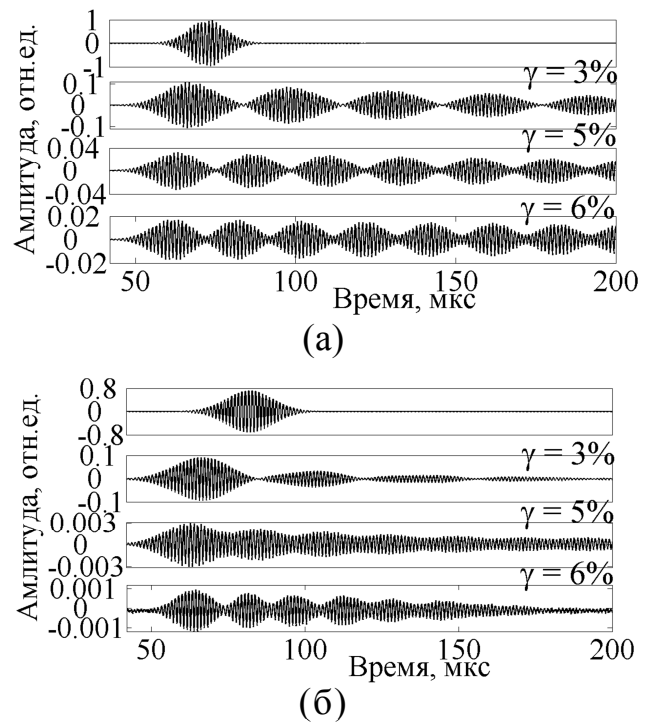


Рис. 3. Сигналы, прошедшие через слоистую среду, для $\gamma = 3, 5, 6\%$ по результатам моделирования (а) и экспериментов (б)

акустические волны. После прохождения через звукопровод (2) они регистрируются демпфированным (4) широкополосным пьезопреобразователем (3). За счёт того, что акустический импульс имеет широкую полосу (от 0.1 до 20 МГц), он содержит как слабо поглощающуюся низкочастотную часть, так и высокочастотную, которая позволяет определить отражение от границы.

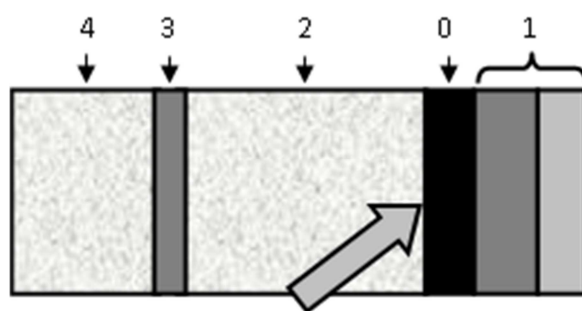


Рис. 4. Схема исследования слоистого объекта с помощью лазерно-ультразвукового преобразователя. 0 - генератор, 1 – исследуемый объект, 2 - звукопровод, 3 - пьезоприёмник, 4 – акустическая нагрузка пьезоприёмника

Для анализа низкочастотной составляющей предлагается анализировать не сам сигнал, а первообразную от него. В этом случае каждый отражённый сигнал представляется в виде перепада первообразной, величина которого зависит от коэффициента отражения от границы, а ширина – от поглощения на протяжении всего пути следования этого импульса. Таким образом, удаётся отделить затухание, связанное с поглощением, от уменьшения амплитуды из-за отражения. Определение импедансов слоёв производится последовательно, от ближайшего слоя к дальнему слою. Величина импеданса первого слоя (1) вычисляется на основе коэффициента отражения от поверхности и значения волнового сопротивления генератора ОА преобразователя (0).

Для апробации данного метода были изготовлены два образца: «дюралюминиевый слой - эпоксидная смола» и «оргстекло - эпоксидная смола». Оба содержали слой с большим поглощением и моделировали случай сильного и слабого рассогласования импедансов слоев. Перед нанесением эпоксидной смолы были получены импедансы твёрдых слоёв по измеренным значениям скорости звука и плотности: дюралюминиевая пластина – $(18.7 \pm 0.9)10^6$ кг/м²с, оргстекло - $(3.1 \pm 0.2)10^6$ кг/м²с. Для краткости приведём результаты измерения только для образца из дюралюминия (рис. 5). Снизу

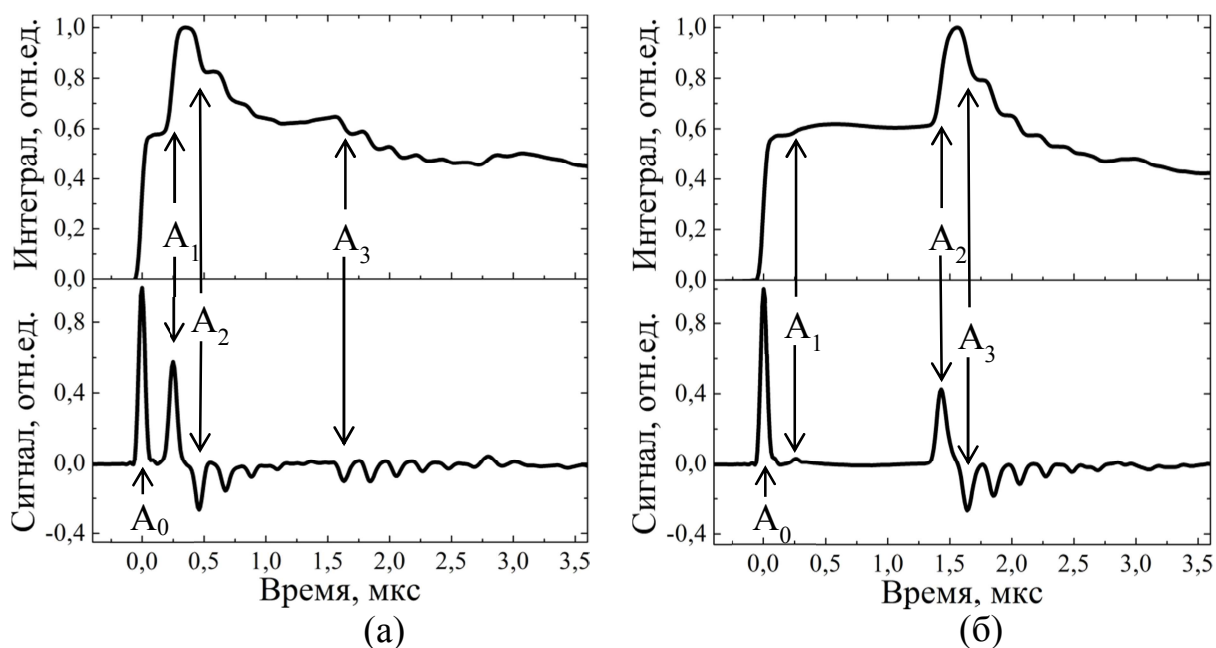


Рис. 5. Сигналы (снизу) и их первообразные (сверху), полученные при отражении от двуслойной структуры «дюралюминий - эпоксидная смола» при исследовании со стороны дюралюминия (а) и эпоксидной смолы (б). A_0 – зондирующий импульс, A_1 – отражение от поверхности, A_2 – отражение от границы слоёв, A_3 – донный импульс

Таблица 1. Результаты измерения упругих параметров (волновое сопротивление, скорость звука и плотность) двуслойной среды «дюралюминий-эпоксидная смола».

Сторона исследования	Измеряемый параметр	По амплитудам сигналов		По перепадам интегралов	
		Дюралюминий	Смола	Дюралюминий	Смола
Дюралюминий	$Z, 10^6 \text{ кг/м}^2\text{с}$	11.0 ± 0.2	4.72 ± 0.09	18.7 ± 0.9	4.0 ± 0.3
	$c, \text{ м/с}$	$(650 \pm 25)10$	$(264 \pm 5)10$	$(650 \pm 25)10$	$(264 \pm 5)10$
	$\rho, \text{ кг/м}^3$	$(17 \pm 6)10^2$	$(18 \pm 6)10^2$	$(2.88 \pm 0.26)10^3$	$(152 \pm 19)10$
Смола	$Z, 10^6 \text{ кг/м}^2\text{с}$	7.7 ± 0.1	3.12 ± 0.04	18.9 ± 0.6	3.44 ± 0.08
	$c, \text{ м/с}$	$(650 \pm 25)10$	$(264 \pm 5)10$	$(650 \pm 25)10$	$(264 \pm 5)10$
	$\rho, \text{ кг/м}^3$	$(119 \pm 14)10$	$(120 \pm 17)10$	$(2.9 \pm 0.3)10^3$	$(130 \pm 5)10$

приведены сигналы, сверху – их первообразные. Результаты измерений, полученные по амплитудам сигналов и величинам перепадов интеграла, приведены в таблице 1.

В случае дюралюминиевой пластины значения импедансов по перепадам первообразной совпали в пределах ошибки, как при измерении с разных сторон, так и со значением, измеренным перед нанесением слоя эпоксидной смолы. Для случая поглощающего слоя величины волновых сопротивлений различаются, что может быть связано с влиянием дифракции на поведение первообразной при больших временных задержках. Все значения, которые были получены по амплитудам отражённых сигналов, оказались сильно заниженными. Скорости звука в слоях определялись по задержкам отражений от их границ и толщине. Плотность вычислялась как отношение импеданса и скорости звука [3-7].

Данный подход оказывается полезным для определения положения расслоения в слоистой структуре: номера слоя, за которым оно находится. Основная сложность, которая возникает при решении подобных задач, заключается в том, что требуется отличить расслоение от мягкой границы. Для этого анализировалась зависимость полного коэффициента отражения (R_{Σ}) от границы слоя или слоистой среды (обозначим её индексом 1) и полубесконечной нагрузки (индекс 2). В качестве примера рассмотрен случай расслоения (между слоем и нагрузкой) и случай мягкой границы. Разница между коэффициентами отражения R_{12} составляла 20%. Экспериментально отличить их достаточно сложно, особенно в случае слоистой структуры. Различие же в R_{Σ} составило $\sim 75\%$, что определить значительно проще. Зависимость полного коэффициента отражения R_{Σ} от времени равно отношению уровня первообразной к величине перепада, соответствующего зондирующему импульсу. Приход отражения от расслоения приводит к резкому спаду первообразной, который не скоро компенсируется. В качестве демонстрации были проведены измерения на композитном материале, состоящем из трёх слоёв дюралюминия, соединённых между собой стеклотканью. В нём имелись расслоения за первой и второй пластинами. На рис. 6 приведены результаты измерения для сигналов (а) и их

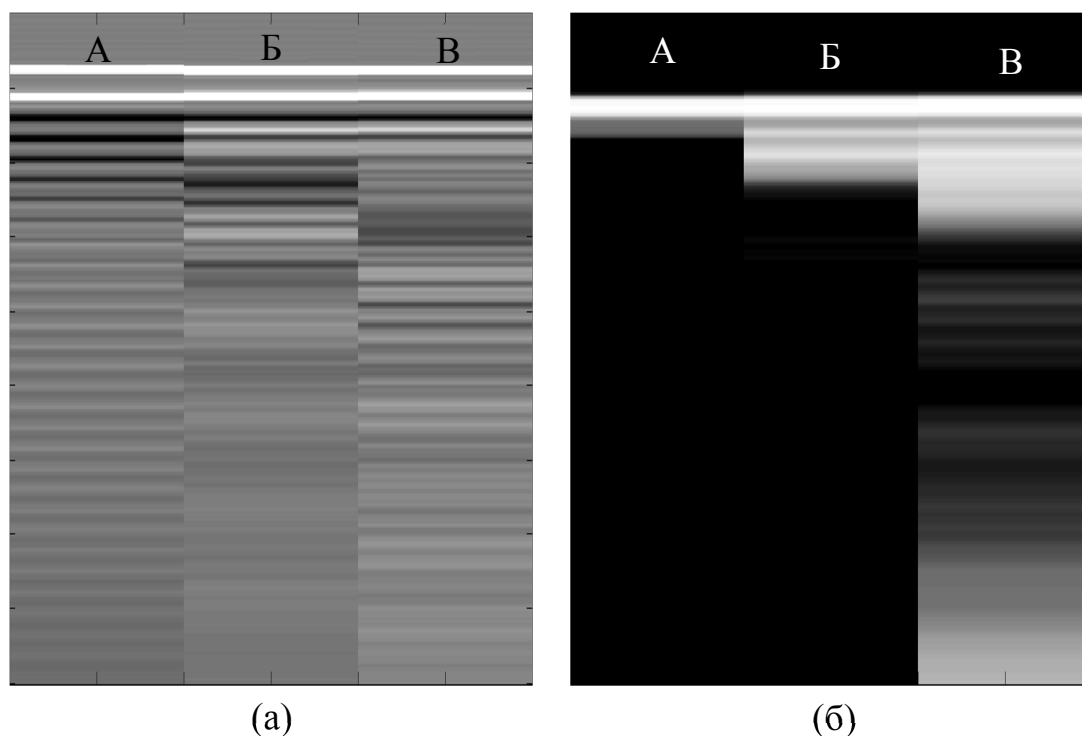


Рис. 6. В-скан для сигналов (а) и их первообразных (б). Амплитуда представляется градацией цвета от чёрного до белого. Случай А – расслоение за первой пластиной, Б – за второй, В – без расслоений

первообразных (б) для случая расслоения за первой пластиной (А), второй (Б) и без расслоений (В). В случае (а) обнаружить нарушение структуры сложно из-за большого количества переотражений, которые маскируют сигнал от расслоения. В случае (б) это сделать гораздо проще, т.к. первообразная не восстанавливается до прежнего уровня после перепада на расслоения [8].

Результаты второй главы опубликованы в статьях [3-8].

Применение плоского преобразователя, описанного во второй главе, возможно только для образцов, имеющих практически плоскую поверхность. Для исследования слоистой структуры конструкций с изгибами, т.е. имеющими вогнутую или выпуклую поверхность, в **третьей главе** предлагается использовать фокусировку оптико-акустических импульсов. Благодаря тому, что они обладают малой длительностью, у преобразователя, который их использует, отсутствует $V(z)$ эффект. Поперечное распределение на источнике повторяет распределение интенсивности падающего лазерного пучка (в частности, для одномодового лазера оно является гауссовым). Поэтому в

фокусе отсутствуют боковые лепестки и отражения от помех вне фокального пятна.

Экспериментальная установка состояла из ОА преобразователя, размещённого на трёхкоординатной трансляционной системе, и кюветы с иммерсионной жидкостью для образцов. Преобразователь имел структуру схожую с той, что была использована в предыдущей главе, за тем лишь исключением, что к ОА генератору крепилась акустическая линза из ПММА. Было исследовано поле фокусирующего преобразователя, измерены диаметр фокальной перетяжки и глубина резкости. Они определялись по зависимости пика отражённого сигнала от координаты при трансляции преобразователя через резкий край пластины. Полученная зависимость имеет форму функции ошибок, т.к. распределение амплитуды в фокусе имеет вид близкий к гауссовскому. Пучок в фокусе имеет форму близкую к кругу с радиусом ~ 0.5 мм [9,10]. Глубина резкости определялась как расстояние между точками, где у пучка радиус в $\sqrt{2}$ раз больше, чем в фокусе. Она составила около 8 мм. Также производилось моделирование акустического поля в параболическом приближении. Численные и экспериментальные результаты достаточно точно совпали, за исключением величины глубины резкости, которая по расчётам должна быть больше. Это отличие связано с ошибкой измерения диаметра пучка, т.к. она растёт при удалении от фокуса.

Для исследования структуры образцов с неплоской поверхностью необходимо перемещать преобразователь так, чтобы положение фокуса было постоянным. Этого можно добиться, если рельеф известен заранее. В обратном случае, его можно измерить с помощью данного преобразователя. Для демонстрации этой возможности были приведены измерения рельефы участков аверса однорублёвой и реверса пятирублёвой монет. На рис. 7 приведены результаты (б) для однорублёвой монеты (а) [11].

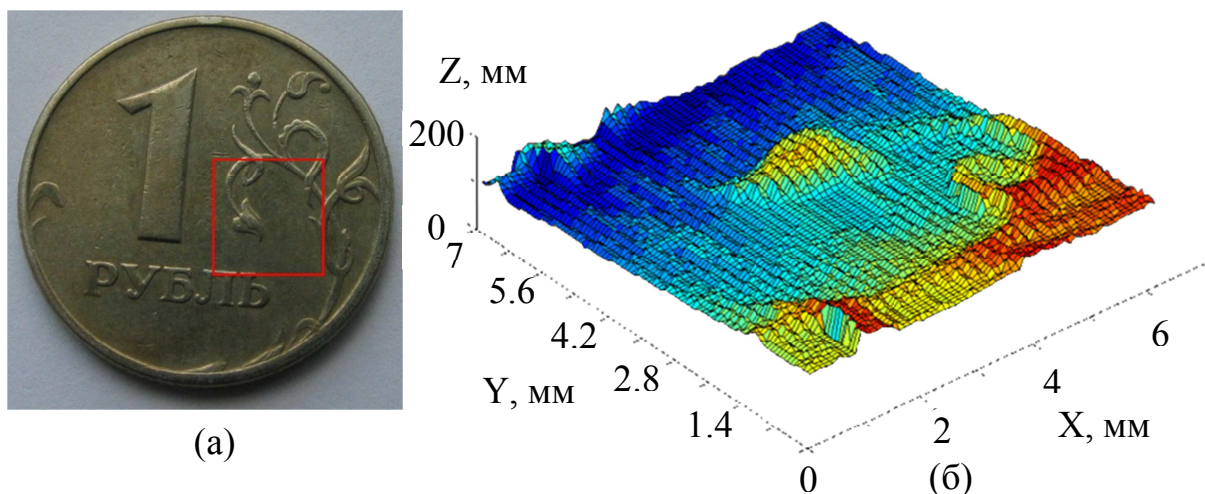


Рис. 7 (а) – аверс одnorублёвой монеты с выделенной областью сканирования, (б) – результаты измерения рельефа

Благодаря высокому продольному разрешению удаётся выявить небольшие отклонения по высоте у соседних элементов на поверхности монеты, даже несмотря на то, что диаметр фокального пятна составляет практически 1 мм.

Пример изображения внутренней структуры композитного материала приведен на рис. 8. Образец представляет собой графитоэпоксидный композит с фрезеровкой на тыльной стороне. Исследование проводилось вдоль линии поперёк данного искусственного дефекта. На рис. 8а приведена его модель с

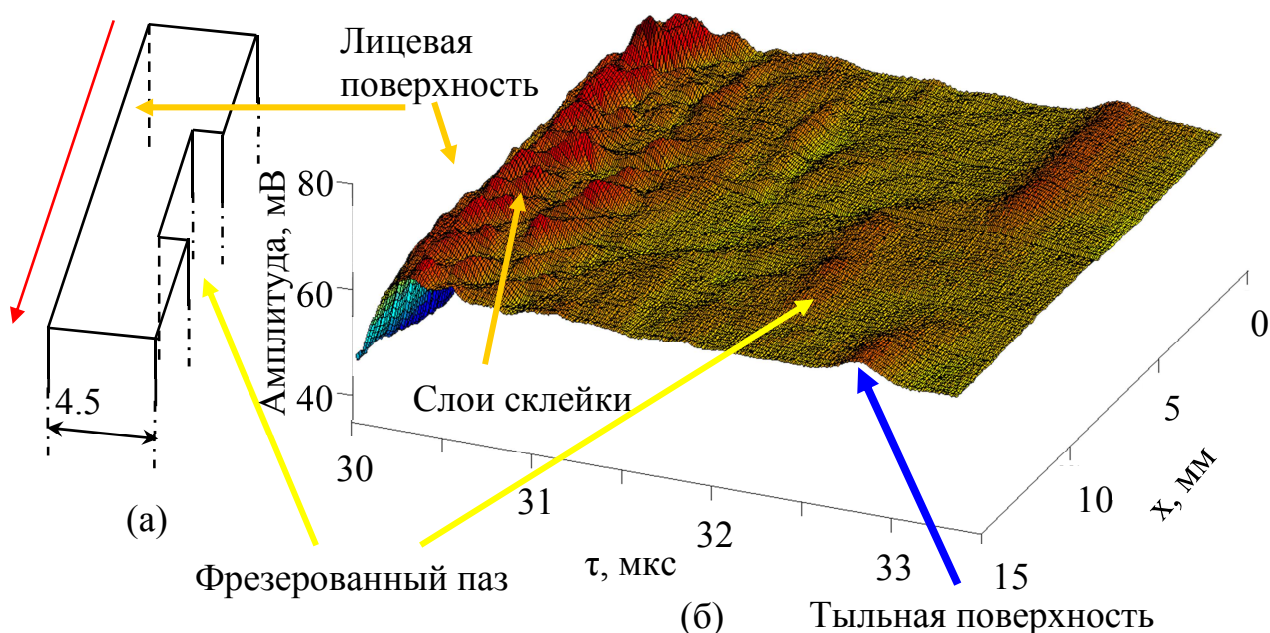


Рис. 8 Модель исследуемого объекта (а) с фрезерованным пазом на тыльной стороне. Результат измерения поперек паза (б)

обозначением траектории движения. Результаты измерений изображены на рис. 8б. На них отчётливо видны отражения от слоёв склейки вблизи лицевой поверхности и донный импульс, задержка которого уменьшается в области фрезеровки [9-12].

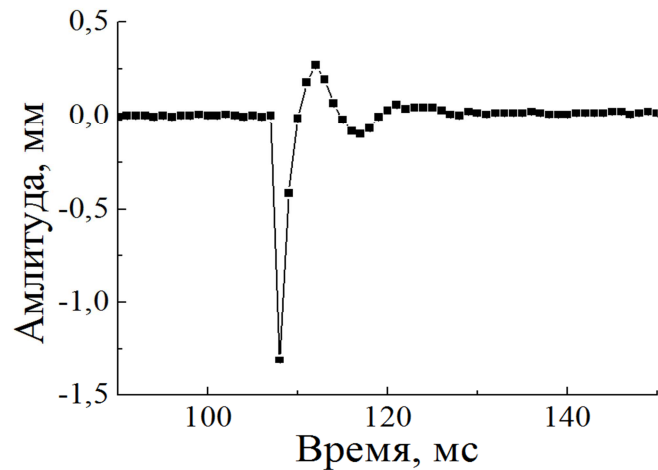


Рис. 9 Зависимость положения поверхности образца от времени

Помимо неразрушающего контроля, высокое продольное разрешение может быть полезно для измерения относительного смещения исследуемого объекта. Это может быть полезно в задачах виброметрии. Для демонстрации такой возможности были проведены измерения вибросмещений поверхности платины, погружённой в воду, движение которой задавалось ударным способом [13]. Исследования проводились в одной точке с частотой посылки импульсов 1 кГц. Это позволяет наблюдать колебание поверхности в частотном диапазоне до 500 Гц. Характеристики прибора дают возможность измерять виброскорости в диапазоне от 3 мкм/с до 8 м/с. На рис. 9 приведена зависимость положения поверхности образца после нанесения удара: резкое смещение вниз с ударом на $\sim 1,25$ мм и затухающие колебания.

Результаты третьей главы опубликованы в работах [9-13].

При исследовании образцов в третьей главе использовался фокусированный пучок с малым углом раскрыва, чтобы в апертуру приёмника не попадали волны утечки. Однако если ось преобразователя наклонена относительно нормали к поверхности, часть падающих волн может не проникнуть дальше, чем за первый слой. Это связано с их трансформацией в поверхностную волну. Для данных волн дальнейшие слои не играют никакой роли, т.к. излучение до них не доходит. Исследованию особенностей ультразвукового пучка при отражении от границы «жидкость-твёрдое тело» под

углом Рэлея посвящена **четвёртая глава**. Данное явление уже наблюдалось ранее. Оно интересно тем, что отражённый пучок имеет в несколько раз большую ширину и неоднородную структуру, т.к. является суперпозицией зеркального отражения и результата излучения в жидкость поверхностной волны, распространяющейся вдоль границы раздела сред. В центре пучка наблюдалась область с нулевой амплитудой, что объяснялось наличием разности фаз между двумя составляющими отражённой волны. Ранее сама тонкая структура отражённого пучка экспериментально не наблюдалась. В данной главе было проведено численное моделирование отражения под углом Рэлея. Оно показало, что эта разность фаз близка к π .

Для экспериментального наблюдения структуры пучка была изготовлена установка, фотография которой приведена на рис. 10. Она помещалась в кювету с водой, через которую пропусклся широкий лазерный пучок. Из-за рефракции света на звуке возникала теневая картина, которая регистрировалась цифровой видеокамерой. Используемый лазер работал в импульсном режиме, при этом длительность импульса была много меньше периода ультразвуковой волны. Задержка между генерацией акустических волн и вспышкой лазера задавалась с



Рис. 10. Экспериментальная установка по наблюдению тонкой структуры волны утечки. 1 – преобразователь, 2,4 – алюминиевые пластины, 3 – крепёжные винты для регулировки наклона пластин

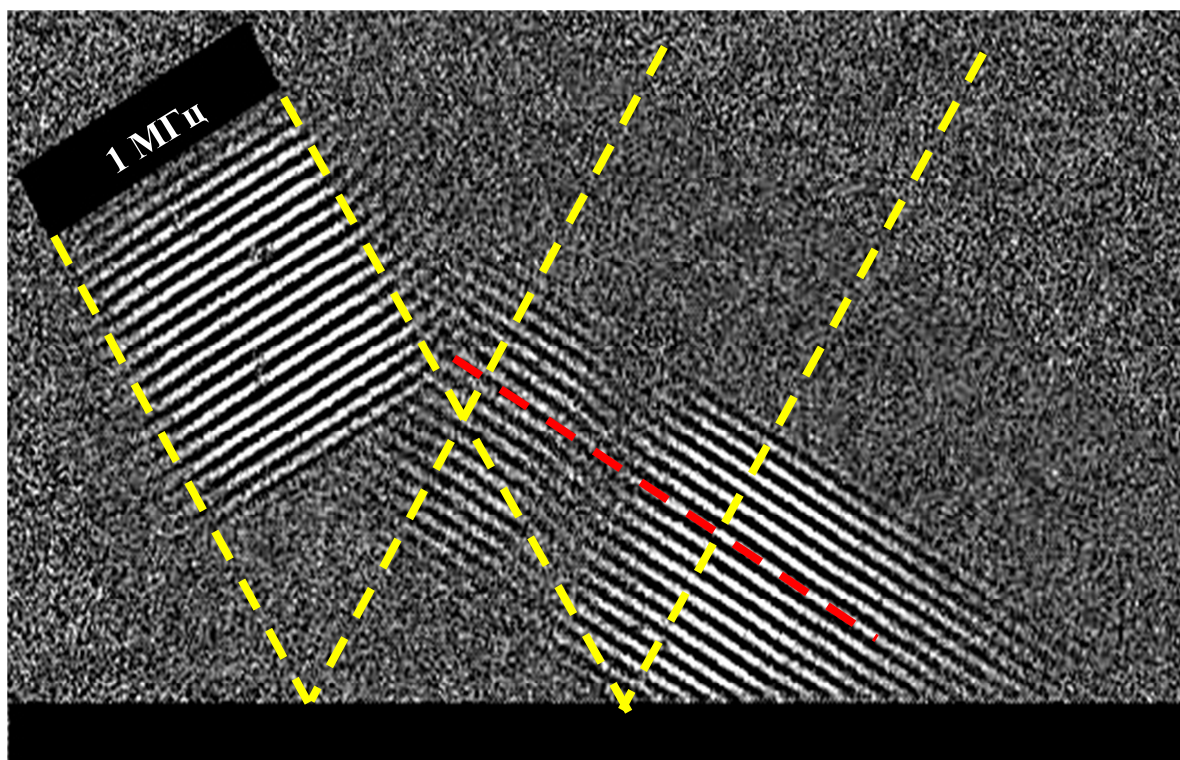


Рис. 11. Вид акустического поля при падении (слева) и после отражения (справа) на границу «жидкость-твёрдое тело» под углом Рэлея. Жёлтыми прерывистыми линиями обозначены границы падающего и зеркально отражённого пучка. Красная линия проведена вдоль фронта отражённого пучка

компьютера. Таким образом, удалось получить распределение «замороженного» акустического поля в различные моменты времени и наблюдать тонкую структуру пучка. На рис. 11 приведен вид падающего и отражённого пучков. Как можно заметить, ширина отражённого пучка значительно увеличилась, а левая и правая части находятся в противофазе.

Ввиду малого поглощения в системе должна выполняться теорема об инвариантности при обращении во времени, т.е. если направить широкий акустический пучок обратно на границу «жидкость-твёрдое тело», то в результате его отражения должен получаться узкий пучок. Это было проверено численно и экспериментально.

На рис. 12 приведены результаты моделирования распространения акустических волн в условиях, схожих с экспериментальными. Моделирование проводилось методом конечных разностей. В начальный момент происходило падение на границу (25÷50 мкс), после чего отражённый пучок приобретал тот

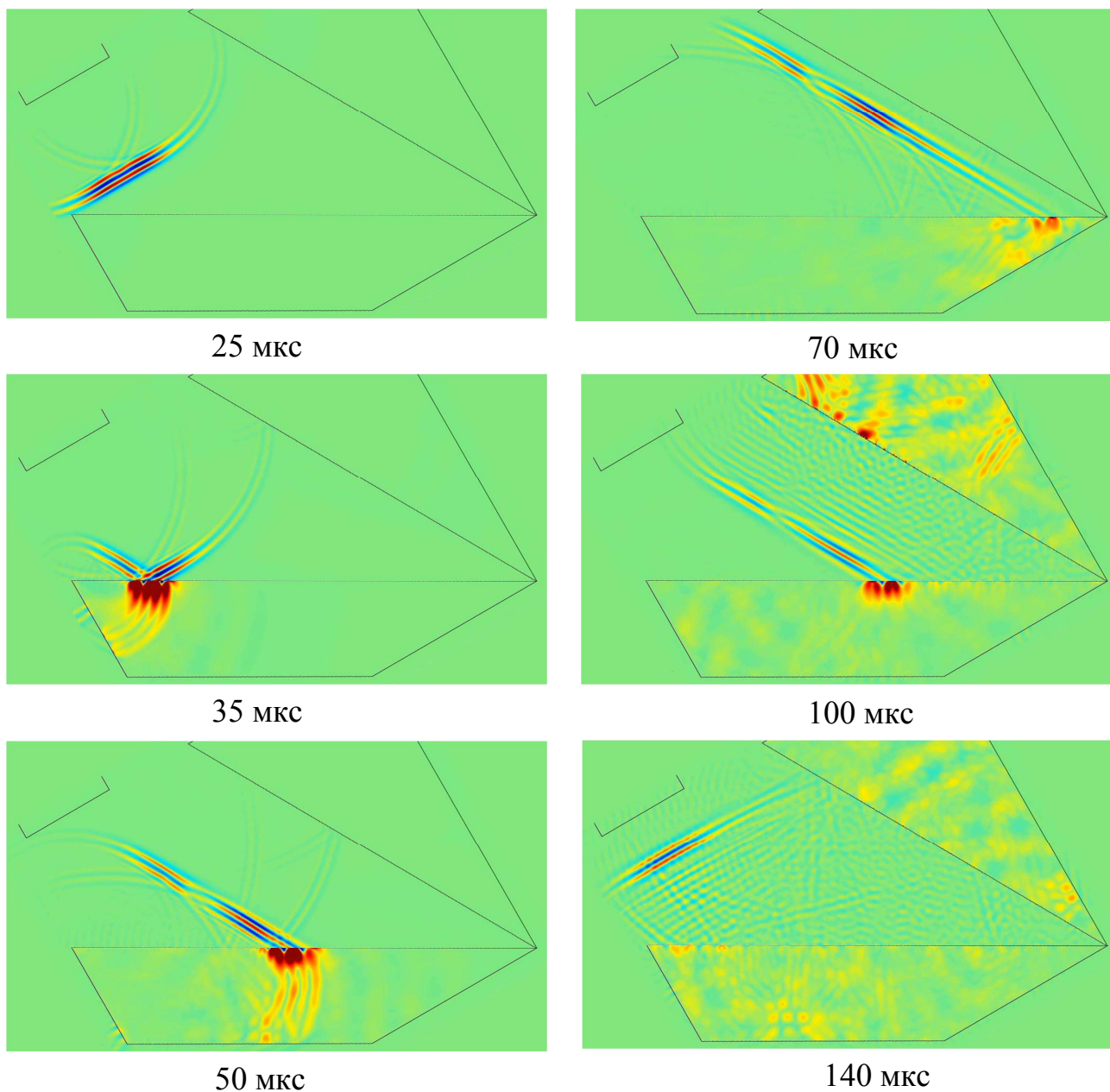
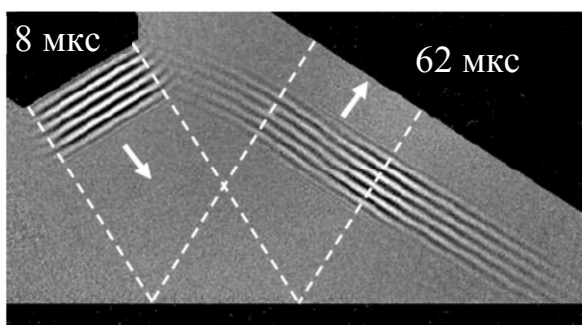


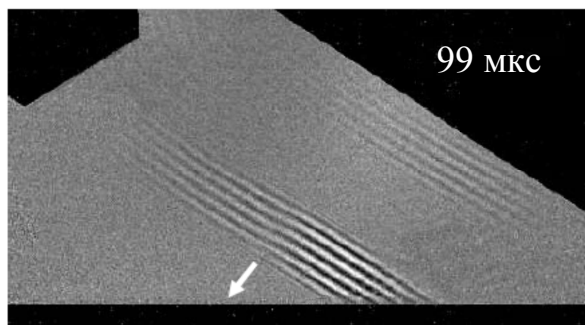
Рис. 12. Результаты расчётов, которые демонстрируют основные моменты распространения акустических волн в жидкости и алюминиевых пластинах. Рисунки приведены в палитре от синего (волн сжатия) до красного (волн растяжения)

же вид, что и на рис. 11. Зеркальное отражение пучка (70, 100 мкс) приводит к его падению обратно на нижнюю пластину. После отражения от неё происходит сжатие пучка (140 мкс).

Теневая картина, которая наблюдалась в эксперименте, в различные моменты времени приведена на рис. 13. На ней видно, как падающий широкий пучок «втекает» в границу без появления зеркального отражения (б).



а)



б)

Рис. 13. Теневые картины распределения акустического поля в различные моменты времени. Расположение источника и отражателей совпадает с рис. 11 и рис. 12. Источник излучает цуг длительностью 5 периодов на частоте 700 кГц, который падает на нижний отражатель под углом Рэлея. Второе зеркало (справа сверху) выставлено по фронту отражённой волны. Стрелками показано направление распространения волны. Случай а) – теневая картина для промежутков времени 8 и 62 мкс, прерывистой линией показана ширина пучка при зеркальном отражении. На б) изображена теневая картина при 99 мкс. На ней можно наблюдать часть нарастающей волны в жидкости

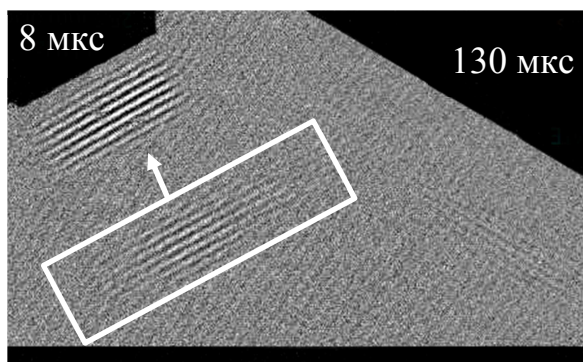


Рис. 14. Поле отражённого пучка при задержке 130 мкс для излучаемого цуга из 5 периодов 1 МГц. Область со сжатым пучком выделена белым прямоугольником

На рис. 14 приведена теневая картина при задержке 130 мкс. Ширина пучка уменьшилась приблизительно в 3 раза и стала сравнимой с первоначальной.

Результаты четвёртой главы опубликованы в статьях [14,15].

Основные результаты работы

1. Впервые экспериментально наблюдался акустический аналог квантово-механического эффекта осцилляций Блоха в виде периодической модуляции огибающей акустического импульса, прошедшего через слоистую структуру. Исследуемая структура состояла из набора

плоскопараллельных стеклянных пластин в жидкости, расстояние между которыми определяло частоту модуляции.

2. Предложен алгоритм вычисления волновых сопротивлений элементов плоскостной структуры по перепадам первообразной сигнала, полученного при отражении от структуры короткого монополярного оптико-акустического импульса. Алгоритм эффективен даже при наличии высокочастотного поглощения. На его основе экспериментально реализован метод обнаружения расслоения в многослойной структуре.
3. Разработан и сконструирован фокусирующий оптико-акустический преобразователь для профилометрии и акустической виброметрии. Такой преобразователь позволяет измерять профиль поверхности образца с точностью до 7 мкм в диапазоне частот от 0.5 до 500 Гц.
4. Создана экспериментальная установка для наблюдения особенностей отражения ультразвукового пучка от границы «жидкость-твёрдое тело» при падении под углом Рэлея. Впервые экспериментально зарегистрировано наличие сдвига фаз 180° между участками отражённого пучка, разделёнными «нулевой» полосой.
5. Впервые экспериментально реализован режим многократного (в 3 раза) сужения акустического пучка с несимметричным профилем при отражении под углом Рэлея от границы раздела «жидкость-твёрдое тело». Показано, что на начальном этапе взаимодействия с границей падающий пучок не испытывает отражения, т.е. имеет вид «втекающей» волны, вся энергия которой трансформируется в поверхностную волну.

Список опубликованных работ

1. **Карабутов А.А. (мл.),** Косевич Ю.А., Сапожников О.А. Осцилляции Блоха акустического поля в слоистой структуре // Акуст. ж. 2013. Т. 59, № 2. С. 158-169.

2. **Карабутов А.А. (мл.)**, Косевич Ю.А., Сапожников О.А. Осцилляции Блоха акустических полей в слоистой структуре // Сборник трудов XXII сессии Российского акустического общества и Сессии Научного совета РАН по акустике. Т. 1. - М.: ГЕОС. 2010. С 8-11.
3. **Karabutov A.A. (Jr.)**, Karabutov A.A., Sapozhnikov O.A. Determination of the elastic properties of layered materials using laser excitation of ultrasound // Phys. Wave Phen. 2010. V. 18, № 4. P. 297-302.
4. Karabutov A.A., Savateeva E.V., Zharinov A.N., **Karabutov A.A. (Jr.)**. Contact laser ultrasonic evaluation of construction materials // Proceedings of «NDT in PROGRESS» V, Brno University of Technology. P. 371-378.
5. **Karabutov A.A. (Jr.)**, Karabutov A.A., Sapozhnikov O.A. Laser ultrasonic investigation of laminate disbonding // 2nd International Symposium on Laser-Ultrasonics - Science, Technology and Applications, Journal of Physics: Conference Series. 2011. V. 278. P. 012010-1-4.
6. **Карабутов А.А. (мл.)**, Карабутов А.А., Сапожников О.А. Исследование упругих характеристик слоистых структур // Сборник трудов XXII сессии Российского акустического общества и Сессии Научного совета РАН по акустике. Т. 2. - М.: ГЕОС. 2010. С. 5-7.
7. **Карабутов А.А. (мл.)**, Карабутов А.А., Сапожников О.А. Определение упругих характеристик у первых слоёв плоскостлоистого композитного материала // Труды XII Всероссийской школы-семинара «Волновые явления в неоднородных средах». 2010. [Электронный ресурс]. М.: Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова. Секция 1. С. 22-27.
8. **Карабутов А.А. (мл.)**, Карабутов А.А., Сапожников О.А. Обнаружение расслоений в слоистых материалах лазерно-ультразвуковым методом в эхо-импульсном режиме // Контроль. Диагностика. 2011. Т. 151, № 1. С. 50-56.

9. **Карабутов А.А.** Фокусированный лазерно-ультразвуковой дефектоскоп // Труды форума «Всемирного года физики в Московском университете». Москва. 2005. С. 8-9.
10. **Карабутов А.А.,** Подымова Н.Б. Фокусированный оптоакустический преобразователь. // Сборник трудов XIX сессии РАО. М.: ГЕОС. 2007. Т. 1. С. 135-138.
11. **Карабутов А.А.** Профилометрия с помощью лазерно-ультразвукового преобразователя // Материалы докладов международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2006». М.: МГУ. Т. 1. С. 32-33.
12. **Карабутов А.А.,** Подымова Н.Б. Лазерно-ультразвуковая дефектоскопия композитных материалов. // Труды X Всероссийской школы-семинара «Волновые явления в неоднородных средах». 2006. [Электронный ресурс]. М.: Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова. Секция 7. С. 40-42.
13. **Карабутов А.А. (мл.),** Сапожников О.А., Карабутов А.А. Исследование возможности использования фокусированного лазерно-ультразвукового преобразователя для акустической виброметрии // Сборник трудов XXV сессия РАО. М.: ГЕОС. 2012. Т. 2. С. 119-122.
14. Sapozhnikov O.A., **Karabutov A.A. (Jr.),** Mozhaev V.G. Experimental evidence for a growing surface wave and acoustic beam narrowing upon reflection from fluid-solid interfaces // Proceedings of the 2007 IEEE International Ultrasonics Symposium (New York, USA). P. 391-394.
15. **Карабутов А.А.,** Сапожников О.А., Можяев В.Г. Использование инвариантности к обращению знака времени в некоторых акустических системах. // Сборник трудов XIX сессии РАО. М.: ГЕОС. 2007. Т. 1. С. 246-249.