


На правах рукописи



**НЕДОСПАСОВ Илья Александрович**

**ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ОБРАТНЫХ И ПРЯМЫХ  
АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В ИЗОТРОПНЫХ И АНИЗОТРОПНЫХ  
ПЛАСТИНАХ И СТРУКТУРАХ НА ИХ ОСНОВЕ**

Специальность 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН), г. Москва.

Научный руководитель: **Кузнецова Ирен Евгеньевна**,  
доктор физико-математических наук,  
доцент.

Официальные оппоненты: **Коробов Александр Иванович**,  
доктор физико-математических наук,  
профессор, профессор кафедры акустики,  
Федерального государственного  
бюджетного образовательного учреждения  
высшего образования «Московский  
государственный университет имени  
М. В. Ломоносова»,

**Левин Вадим Моисеевич**,  
кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник, заведующий  
лабораторией акустической микроскопии  
Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки Института  
биохимической физики им. Н.М.  
Эммануэля Российской академии наук.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Саратовский национальный  
исследовательский государственный  
университет имени Н.Г Чернышевского».

Защита состоится 11 октября 2019 г., в 10:00 на заседании диссертационного  
совета Д 002.231.01 на базе ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН по адресу: 125009,  
г. Москва, ул. Моховая, д. 11, корп. 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИРЭ им. В.А.Котельникова  
РАН и на сайте <http://cplire.ru/rus/dissertations/Nedospasov/index.html>

Автореферат разослан " \_\_ " \_\_\_\_\_ 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного  
совета доктор физико-математических  
наук, доцент



Кузнецова  
Ирен Евгеньевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Хотя волнам Лэмба уже более ста лет и их спектр широко известен, но на существование частотных диапазонов, характеризующихся противоположно направленными фазовой и групповой скоростями, впервые обратили внимание только в 1957 г. Такие волны в литературе принято называть обратными. С тех пор обратные акустические волны широко исследовались экспериментально и теоретически как в изотропных, анизотропных и пьезоэлектрических пластинах, так и в многослойных структурах, фононных кристаллах, трубах, оболочках и полых цилиндрах [1-3]. В частности, были аналитически и численно оценены величины материальных постоянных изотропных пластин, при которых возможно существование обратных волн Лэмба высших порядков. Также было аналитически показано, что наличие сложных вогнутостей на поверхности медленности может вносить определяющий вклад в значительное уширение частотных диапазонов существования обратных волн Лэмба [4].

Обратные волны возникают не только в спектрах волн Лэмба, но и в спектрах чисто сдвиговых мод в пьезоэлектрических пластинах, притом, что в случае отсутствия пьезоэффекта последние волны не существуют. Следует отметить, что сдвиговые волны в пьезоэлектрических пластинах к настоящему времени мало изучены. В известных работах эти волны исследованы для высокосимметричных кубических кристаллов. Также ранее было показано, что обратные чисто сдвиговые волны существуют в гексагональных пьезоэлектрических пластинах, но только для семейства антисимметричных мод, а в кубических пластинах – как для антисимметричных, так и для симметричных [5-6]. Что касается кристаллов других симметрий, то такие работы практически отсутствуют.

Следует отметить, что пристальное внимание исследователей привлекают вопросы, связанные с акустическими волнами у которых групповая скорость равна нулю. Существование таких волн обусловлено наличием участков в спектрах мод пластин, как с отрицательной, так и с положительной групповой скоростью, где данная точка является промежуточной. Было показано, что существует возможность создания резонатора нового типа на основе акустических волн с нулевой групповой скоростью. Таким образом, энергия волны будет концентрироваться по толщине пластины в области возбуждающего преобразователя, что приведет к новым возможностям создаваемого устройства [7].

В настоящее время существует несколько способов возбуждения обратных акустических волн. В изотропных пластинах обратные волны Лэмба могут возбуждаться при помощи лазера [8]. В результате нагрева лазерным излучением приповерхностного слоя возникают нестационарные термоупругие напряжения, приводящие к возбуждению как прямых, так и обратных акустических волн. Акустические волны в непьезоэлектрических пластинах могут быть также возбуждены методом клина [9]. В этом случае пьезоэлектрический излучатель размещается в верхней части клина, помещенного на поверхность пластины. Варьируя углы клина можно менять

проекцию волнового числа на поверхность образца, что позволяет эффективно возбуждать как прямые, так и обратные акустические волны в пьезоэлектрических пластинах.

Очевидно, что для возбуждения обратных акустических волн в пьезоэлектрических пластинах можно использовать встречно-штыревые преобразователи (ВШП). Основным вопросом при данном способе возбуждения является доказательство возбуждения именно обратной волны. В общем случае ВШП излучает акустическую волну в обе стороны и задача фиксации противоположно направленных фазовой и групповой скоростей в этом случае является нетривиальной. Одним из способов регистрации именно обратной акустической волны является исследование ее распространения в пьезоэлектрической пластине, находящейся в контакте с полупроводниковым слоем. Этот слой формирует продольный поток зарядов и, соответственно, акустоЭДС. Зная знак акустоЭДС и тип носителей заряда можно однозначно определить направление групповой скорости.

Как известно, изменение электрических граничных условий на поверхности пьезоэлектрических пластин, приводит к существенному изменению характеристик акустических волн (скорость, затухание и т.д.). Однако, работы, посвященные исследованию влияния электрических граничных условий на свойства обратных акустических волн – отсутствуют. Хотя данные исследования очень важны при создании различных сенсоров, основанных на данном типе волн.

Клиновые акустические волны, локализованные на конце бесконечного упругого клина, являются одномерными примерами волноводных мод. Такие системы также допускают возникновение вытекающих волн, которые излучают энергию в упругую среду вдали от волновода, и их амплитуда уменьшается вдоль направления распространения в результате такой потери энергии. Акустические вытекающие клиновые волны были впервые обнаружены в однородных анизотропных клиньях в экспериментах с лазерным ультразвуком [10], и недавно было обнаружено, что в численном моделировании они также существуют в клиньях, сделанных из двух изотропных материалов. Также в литературе экспериментально исследовались нелинейные акустические свойства остроугольных клиньев с дефектами [11].

Недавно было показано, что одномерные локализованные акустические волны существуют на линии пересечения общей границы раздела и поверхности двух четвертьпространств [12]. Они были названы волнами Рэля-Стоунли. В то время как в изотропных средах волны Рэля существуют для всех физических значений коэффициента Пуассона, волны Стоунли не существуют для всех комбинаций констант Ламе и плотностей двух соседних сред. Шолте определил область их существования в двумерном пространстве параметров для двух пуассоновских сред (т.е. изотропных упругих сред с двумя равными константами Ламе). Было обнаружено, что область существования одномерных волн Рэля-Стоунли, распространяющихся на интерфейсе двух четвертьпространств, является небольшим подмножеством области существования волн Стоунли.

Для клиновидных систем, состоящих из нескольких сред, были проведены численные поиски одномерных волноводных локализованных акустических мод. Цель этого поиска состоит в том, чтобы найти такие волны и исследовать их свойства, например, для нужд неразрушающего контроля и геофизики. Волноводные моды таких систем, могут, по меньшей мере, частично рассматриваться как обобщения клиновых акустических волн, то есть акустических волн, направляемых линией вершины однородного усеченного упругого клина. Теоретический метод, который обычно используется для этих целей, - это, по существу, один из тех, который применялся уже при открытии и ранних исследованиях клиновых волн, а именно полуаналитический метод конечных элементов. Другой подход, используемый при первом их описании, основывался на разложении поля смещений в двойной ряд специальных функций, особенно подходящих для рассматриваемой геометрии. В дальнейшем вычислительные методы были доработаны и адаптированы к более сложным системам. В частности, они были расширены, чтобы включить источник, который упрощает поиск вытекающих волн. Комплексное исследование вытекающих волн в этих системах может быть основано на случайных источниках.

## **ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

Целью диссертационной работы является аналитическое, численное и экспериментальное исследование прямых и обратных акустических волн различных типов в изотропных и анизотропных пластинах и клиновидных структурах.

## **ЗАДАЧИ РАБОТЫ**

1. Теоретическое и экспериментальное исследование обратных акустических волн Лэмба в пьезоэлектрических пластинах.
2. Анализ энергетических характеристик вытекающих обратных волн Лэмба в изотропных пластинах и структурах на их основе с помощью численных и аналитических методов.
3. Теоретическое исследование вопроса о возникновении и существовании чисто сдвиговых обратных акустических волн в пьезоэлектрических пластинах на основе асимптотического разложения дисперсионных соотношений.
4. Теоретическое исследование влияния различных электрических граничных условий на характеристики обратных сдвиговых акустических волн в пьезоэлектрических пластинах.
5. Теоретическое исследование возбуждения и распространения локализованных акустических мод в волноводах сложной формы.

## НАУЧНАЯ НОВИЗНА РАБОТЫ

1. Впервые предложен и экспериментально верифицирован новый способ детектирования обратных акустических волн в пьезоэлектрических пластинах, основанный на использовании набора встречно-штыревых преобразователей с различным пространственным периодом, расположенных на общей подложке.
2. Впервые теоретически установлено необычное свойство энергетических характеристик вытекающих обратных волн Лэмба в изотропных пластинах, погруженных в жидкость, заключающееся в равенстве нулю интегрального усредненного потока энергии.
3. Теоретически исследован вопрос о существовании чисто сдвиговых обратных волн в пластинах ромбического кристалла ниобата калия. Впервые проведен теоретический анализ сдвиговых волн в пьезоэлектриках на основе асимптотического разложения дисперсионных соотношений. Показано, что главными механизмами возникновения обратных волн являются кривизна поверхности медленности и отрицательный сдвиг фазы отраженной от границы волны.
4. Теоретически исследовано влияние электрических граничных условий на распределение электрического потенциала по толщине пьезоэлектрической пластины для обратных и прямых сдвиговых волн в пластине из ниобата калия. Впервые показано, что изменением проводимости бесконечно тонких слоев, находящихся на поверхностях пластины, вышеуказанное распределение может быть изменено в пределах 90%.
5. Теоретически исследованы локализованные акустические моды в волноводах сложной формы состоящих из нескольких сред. Установлены диапазоны существования локализованных акустических волн в пространстве материальных параметров. Впервые показано, что в данных структурах присутствуют обратные акустические волны.

## НАУЧНАЯ И ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ РАБОТЫ

Работа направлена на теоретическое и экспериментальное исследование характеристик прямых и обратных акустических волн, распространяющихся в изотропных и анизотропных пластинах и структурах, а также в волноводах сложной формы. Научная значимость исследования характеристик обратных волн заключается в получении новых фундаментальных знаний об особенностях волновых процессов в твердых телах и сложных структурах, в том числе характеризующихся уникальными физическими характеристиками. Практическая значимость работы заключается в возможности разработки различных устройств обработки сигналов и сенсоров, характеризующихся повышенной эффективностью и чувствительностью, расширенным частотным диапазоном и улучшенной селективностью. Эти волны могут также использоваться в широко распространённых методах неразрушающего

контроля. В ходе работы подробно исследовался вопрос о существовании волн в описанных системах, выявление факторов, к которым они наиболее чувствительны, а также вопрос их возбуждения.

## **ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ**

1. Обратные акустические волны возбуждаются и детектируются при помощи системы из резонаторов на основе встречно-штыревых преобразователей с различным пространственным периодом, расположенных на одной пьезоэлектрической подложке. Данный новый способ реализован в устройстве для возбуждения и детектирования А1 волны Лэмба в YX пластине ниобата лития.
2. Усредненный по времени интегральный поток энергии вытекающих обратных волн Лэмба в изотропных пластинах, находящихся в контакте с жидкостью равен нулю. Определение скорости переноса энергии в случае обратных вытекающих волн Лэмба возможно на основе ограничения области интегрирования только толщиной пластины.
3. Основными механизмами возникновения чисто сдвиговых обратных акустических волн в пьезоэлектрических пластинах являются отрицательная кривизна поверхности медленности объемных сдвиговых волн и отрицательный сдвиг их фазы при отражении волны от границы пластины с вакуумом.
4. Распределение электрического потенциала прямых и обратных акустических сдвиговых волн внутри пьезоэлектрической пластины изменяется путем варьирования проводимости бесконечно тонких слоев, находящихся на поверхностях пластины. В пластине YX  $\text{KNbO}_3$  изменение проводимости слоев на ее поверхностях от  $10^{-6}$  до  $10^{-3}$  См/м позволяет управлять распределением электрического поля вышеуказанных волн в пределах до 90%.
5. Акустические локализованные моды существуют в волноводах в виде полупространства состоящего из двух клиньев с общей наклонной границей (i), в клине, состоящем из двух сред (ii) и в волноводах в виде усеченного клина состоящих из трех сред (iii). Область существования в пространстве материальных параметров для случаев пуассоновских сред уменьшается с увеличением угла наклона в волноводах (i) и (ii). В спектрах волноводов в виде края из искусственного каучука с жесткими границами и того же края, граничащего с двумя четвертьпространствами из оргстекла, существуют частотные диапазоны, соответствующие обратным акустическим волнам.

## **АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ**

Результаты проведенных исследований докладывались на ряде научных конференций, в число которых входят: Конкурс молодых ученых имени Ивана Анисимкина ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН (2014, 2016, 2018, Москва,

Россия), Days on Diffraction (2017, St. Petersburg, Russia), Всероссийская школа-семинар «Волновые явления в неоднородных средах» имени А.П. Сухорукова (2016, Можайск, Россия), 2016 IEEE International Ultrasonics Symposium (2016, Tours, France), 2017 IEEE International Ultrasonics Symposium (2017, Washington, D.C., USA), 2017 EFTF and IEEE International Frequency Control Symposium (2017, Besançon, France), 2018 IEEE International Ultrasonics Symposium (2018, Kobe, Japan), сессия Российского акустического общества (2017, Нижний Новгород, Россия), всероссийская научная конференция молодых ученых «нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика» (2015, Саратов, Россия), International Conference for Young Researches «Wave Electronics and Its Applications in the Information and Telecommunication» (2017, St. Petersburg, Russia), семинар кафедры акустики физического факультета МГУ (2019, Москва, Россия).

## **ПУБЛИКАЦИИ**

По теме диссертации в журналах и сборниках опубликовано 15 печатных работ (из них 9 статей в рецензируемых журналах, 5 входящих в список ВАК, 4 статьи в журналах, входящих в системы цитирования WoS и Scopus).

## **ВКЛАД АВТОРА**

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

## **СТРУКТУРА И ОБЪЁМ ДИССЕРТАЦИИ**

Диссертация включает в себя введение, три главы и заключение. Полный объем диссертации составляет 129 страниц с рисунками и таблицами. Список литературы состоит из 113 ссылок.

Во **введении** представлен обзор основной литературы по теме работы. Описаны актуальность тематики, научная новизна и значимость результатов. Также введение содержит список основных положений, выносимых на защиту, и информацию о том, где эти результаты прошли апробацию. Представлен обзор работ по теоретическим и экспериментальным методам исследования обратных волн в различных пластинах и структурах. Также в данной части сделан обзор работ связанных с волноводами сложной формы, которые имеют вид клиново-кромочных структур с различными граничными условиями. Описаны работы с возможными приложениями данных волноводов.

**Первая глава** посвящена задачам распространения и возбуждения волн Лэмба в изотропных и анизотропных пластинах. Описан основной метод решения задачи распространения волн в пластинах, широко используемый во всех главах работы. С помощью данного метода рассчитаны дисперсионные кривые для волн Лэмба в пластине YX ниобата лития. На основе полученных



результатов проведено экспериментальное исследование обратных волн с помощью возбуждения данных мод в резонаторах на встречно штыревых преобразователях с различными пространственными периодами. Для сравнения экспериментальных и теоретических результатов методом конечных элементов в среде COMSOL проведено моделирование указанных резонаторов с учетом источников, возбуждающих волны (рис. 1).

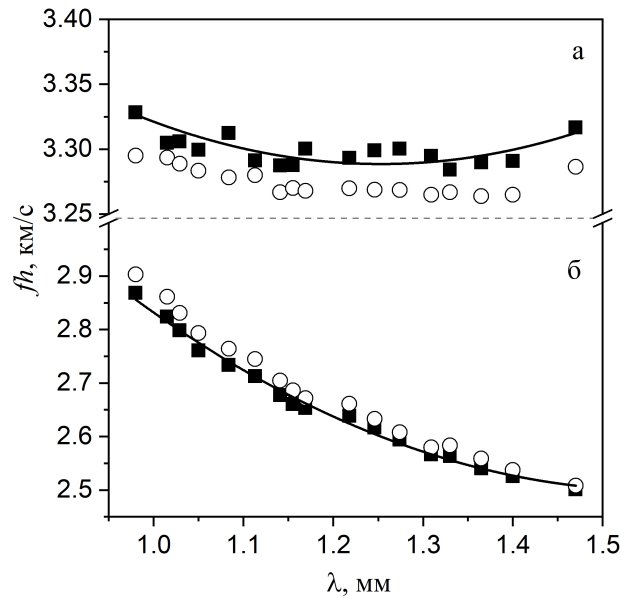


Рис.1. Частотные зависимости положений откликов  $A_1$  (а) и  $SH_1$  (б) волн от периодов ВШП, полученные экспериментально (квадраты), и с помощью моделирования (круги).

Также в данной главе проведены расчеты энергетических характеристик обратных вытекающих волн Лэмба, в изотропных пластинах, погруженных в жидкость. Аналитически показано, что усредненный по времени и интегральный по глубине горизонтальный поток энергии равен нулю (рис. 2).

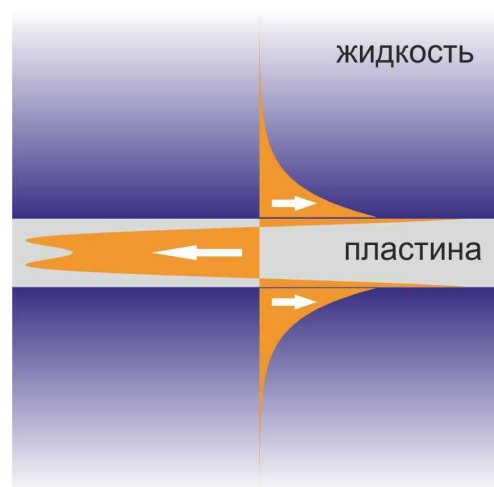


Рис. 2. Распределение горизонтальных потоков энергии вытекающих обратных волн Лэмба в системе пластина/жидкость, приводящих к нулевому потоку полной энергии.

Предложен способ расчета скорости переноса энергии для случая обратных вытекающих волн Лэмба. Применение теории возмущений для анализа обратных вытекающих волн Лэмба в контакте с жидкостью также позволило получить соответствующие выражения для характеристик данных мод.

Во **второй** главе представлен точный вывод дисперсионных соотношений для чисто сдвиговых волн в пластинах ниобата калия Y- и X-срезов. Данные секулярные уравнения решены численно и на основе этих вычислений построены дисперсионные кривые. С другой стороны, применение теории возмущений и асимптотического разложения для дисперсионных уравнений позволило получить выражения для приближенного описания фазовой и групповой скоростей в окрестностях точек рождения. Сравнение численных и асимптотических результатов показало хорошее совпадение в данной области (рис. 3).

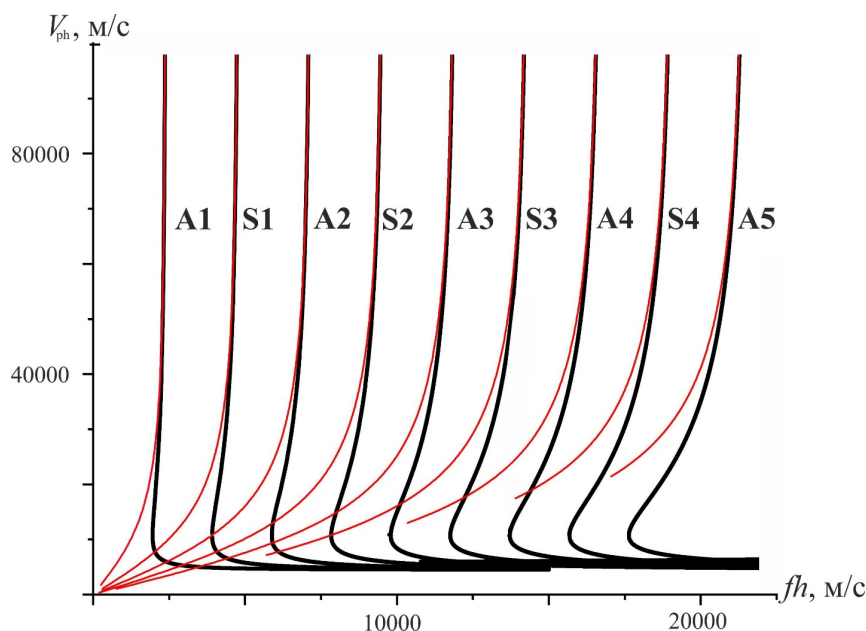


Рис. 3. Дисперсионные зависимости фазовых скоростей для первых девяти мод с отсечкой в пластине кристалла ниобата калия X-среза посчитанные с помощью численного счета (черные линии) и с помощью асимптотического разложения уравнений (красные линии).

Далее вышеупомянутые разложения были использованы для анализа механизмов возникновения обратных сдвиговых волн. Оказалось, что в данном представлении каждый механизм прописывается аддитивно в виде коэффициентов членов разложения. Показано, что можно точно указать какой коэффициент данного разложения, за какой механизм отвечает. Один из них описывает влияние кривизны поверхности медленности на существование обратных волн в спектре сдвиговых волн. Обнаружено, что ориентация положительной либо отрицательной вогнутостей данных поверхностей для сдвиговых объемных волн кристалла ниобата калия относительно границ

пластины сильно влияет на направления проекций групповой и фазовой скоростей (рис. 4).

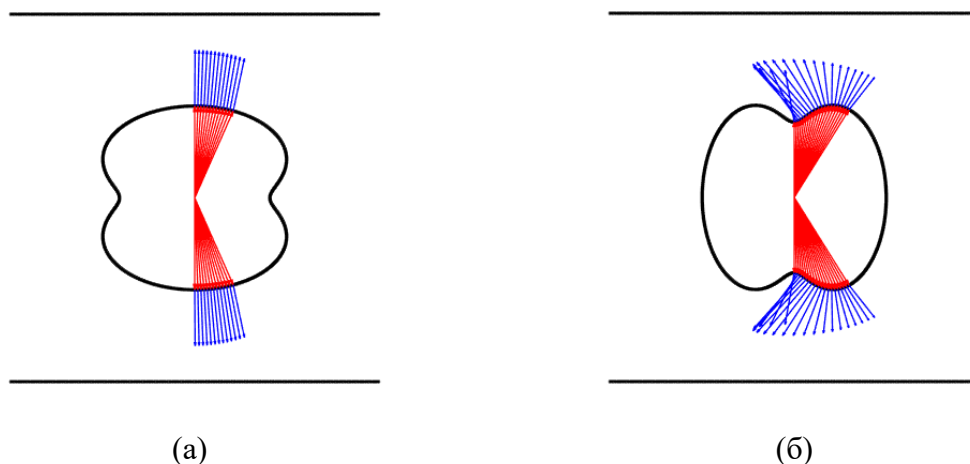


Рис. 4. Сечения поверхности медленности объемных сдвиговых волн сагиттальными плоскостями в пластинах кристалла ниобата калия  $Y$ - и  $X$ -срезов (а и б, соответственно). В области вогнутости возникает разнонаправленность векторов  $\vec{s} = 1/\vec{v}_{ph}$  (красные векторы) и групповой скорости  $\vec{v}_{gr}$  (синие векторы) относительно горизонтальной оси (а) и вертикальной оси (б).

Второй механизм описывается коэффициентом при линейном члене разложения. Показано, что данный коэффициент равен величине отрицательного сдвига фазы объемной плоской сдвиговой волны при отражении от границы пьезоэлектрического кристалла с вакуумом. Действие данного механизма качественно продемонстрировано на трех возможных случаях наклонных отражений плоской сдвиговой волны от границ пластины (рис. 5).

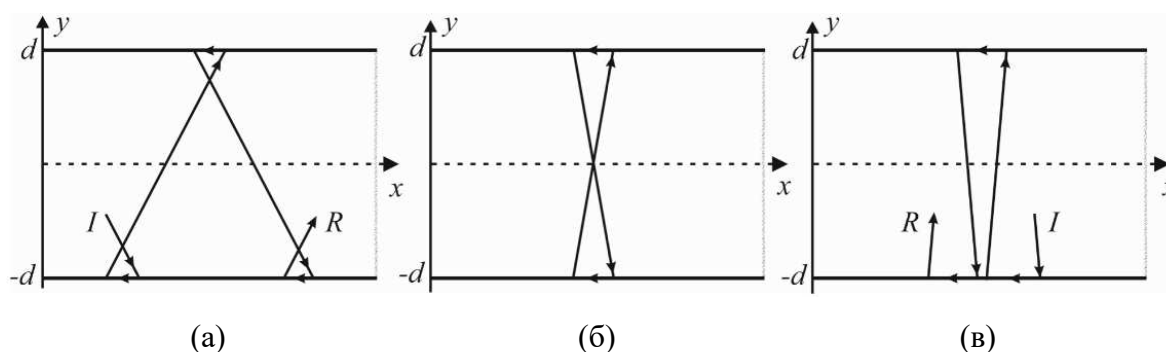


Рис. 5. Картины наклонного отражения лучей объемных сдвиговых волн с отрицательным смещением от верхней границы гексагональной пьезоэлектрической пластины толщиной  $h$ , соответствующие образованию прямой волноводной моды (а), моды с нулевой групповой скоростью (б), обратной моды (в).

На основании полученных результатов были идентифицированы основные механизмы, ответственные за возникновение сдвиговых обратных акустических мод в пьезоэлектрических пластинах.

В данной главе также проведен теоретический анализ влияния электрических граничных условий на характеристики обратных сдвиговых акустических мод в пьезоэлектрических пластинах. В расчетах проводящий слой считался бесконечно тонким и его механическое воздействие на поверхность пластины не учитывалось. Влияние данного слоя учитывалось только через скачок нормальной компоненты электрической индукции равный величине поверхностного заряда. С помощью численных расчетов показано, что постепенная металлизация пьезоэлектрической пластины XY ниобата калия сначала с одной стороны, а затем с двух, приводит к смещению спектра сдвиговых волн влево по частоте (рис. 6). Также из этих расчетов следует, что металлизация может приводить к исчезновению обратной низшей моды в спектре.

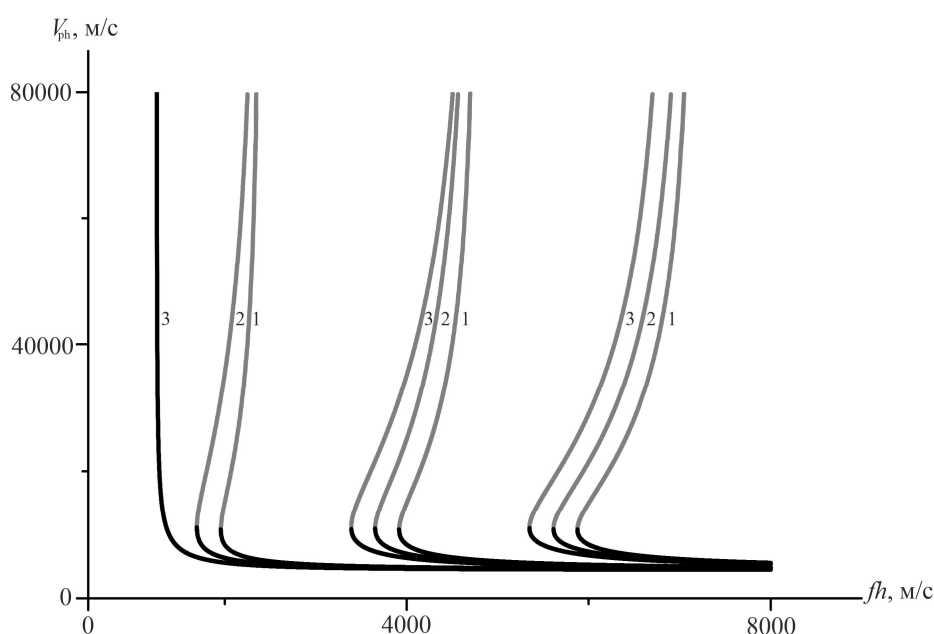


Рис 6. Зависимость фазовой скорости прямой (черные линии) и обратной (серые линии) части чисто сдвиговых мод в пластинах XY  $\text{KNbO}_3$  от величины  $fh$ : 1 – электрически свободная пластина, 2 – закороченная с одной стороны пластина, и 3 – закороченная с двух сторон пластина.

Также показано, что с помощью постепенного изменения проводимости тонких слоев, расположенных на поверхностях пьезоэлектрической пластины, можно изменять распределения электрического потенциала и механического смещения указанных волн по толщине пластины (рис. 7). Здесь стоит отметить, что изменение распределения вышеуказанных величин у обратных мод имеет более сильную зависимость от проводимости, чем у прямых мод.

В результате был сделан вывод, что с помощью изменения электрических граничных условий на поверхности пластины возможно эффективное управление распределением электрического потенциала волны по глубине пластины.

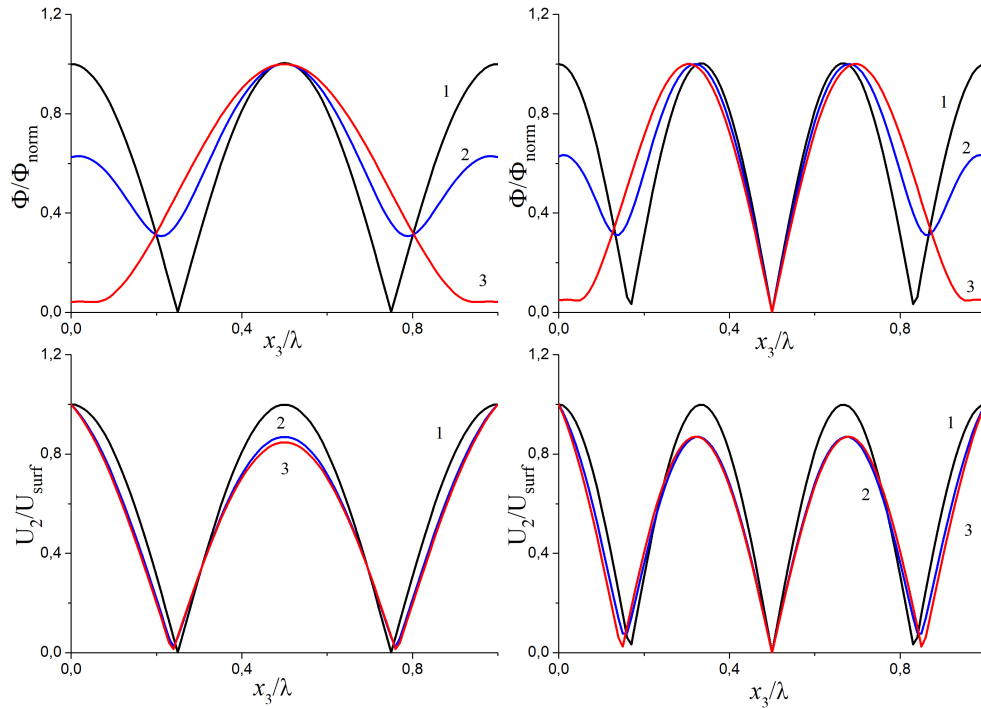


Рис. 7. Распределения величин электрического потенциала (верхний ряд) и компоненты механического смещения  $U_2$  (нижний ряд), нормированные на соответствующие максимальные значения для обратных мод SH<sub>2</sub>, SH<sub>3</sub> по толщине пластины XY KNbO<sub>3</sub> при  $hf_{SH1} = 2$  км/с,  $hf_{SH2} = 4$  км/с,  $hf_{SH3} = 6$  км/с. Кривые 1, 2 и 3 соответствуют значениям  $\sigma_s = 10^{-8}$  См/м,  $5 \times 10^{-5}$  См/м и слоев  $10^{-3}$  См/м, расположенных в плоскостях  $x_3 = 0$  и  $x_3 = h$ , соответственно.

В третьей главе исследованы локализованные моды в волноводах сложной формы, состоящих из нескольких клиньев и краев. Для изучения волн в данных структурах, в первую очередь, подробно описан полуаналитический метод конечных элементов. Также показан способ решения задачи в случае учета внешнего гармонического источника на поверхностях этих структур. Для того чтобы удовлетворять условиям затухания волн на бесконечности введено и описано математическое понятие идеально согласованного слоя.

В данной главе подробно изучены аналоги волн Рэлея-Стоунли в полупространствах, состоящих из двух изотропных упругих клиньев с общей плоской наклонной границей. Получен график существования данных волн в пространстве материальных параметров для случаев пуассоновских сред при различных углах наклона общей границы (рис. 8). Анализ полученных результатов показал, что области существования волноводных мод для больших углов являются подмножествами областей для меньших углов.

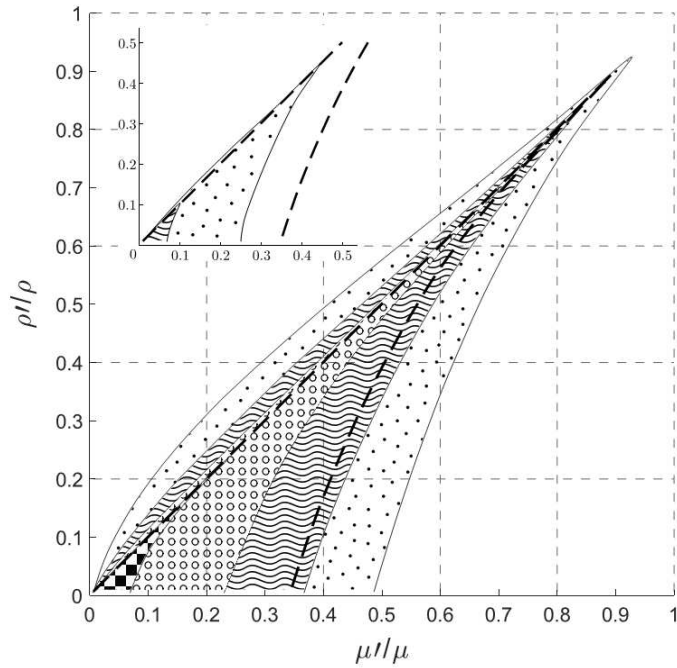


Рис. 8. Область существования волноводных мод в структурах в виде полупространства из двух пуассоновских сред с плотностями  $\rho, \rho'$  и модулями сдвига  $\mu, \mu'$ . Углы  $\theta = 90^\circ$  (квадраты),  $70^\circ$  (открытые круги),  $50^\circ$  (волнистые линии),  $30^\circ$  (точки). Пунктирные линии: граница области существования волн Стоунли. Вставка: область существования второй моды для углов  $\theta = 50^\circ$  (волнистые линии),  $30^\circ$  (точки).

Также построены распределения полей первых двух мод для системы из двух пуассоновских сред, образующих полупространство с общей наклонной границей (рис. 9).

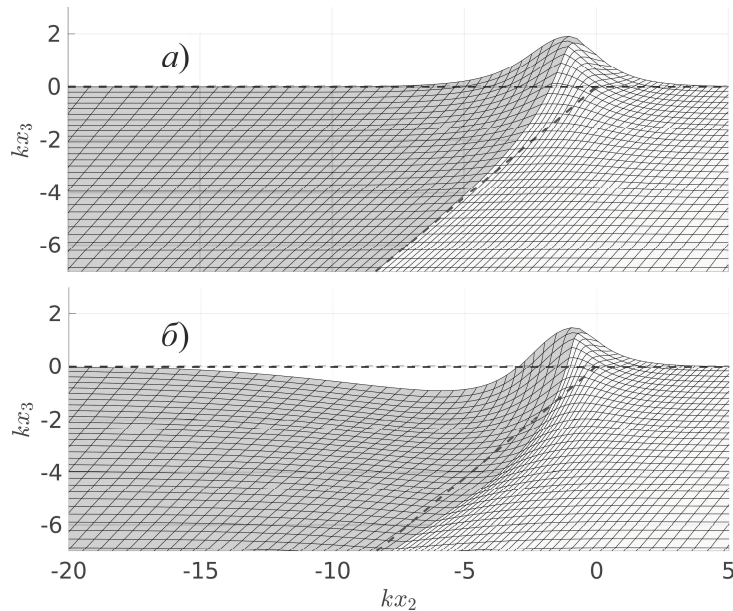


Рис. 9. Смещения для первой (верхний) и второй (нижний) мод. Угол  $\theta = 40^\circ$ ,  $\mu'/\mu = 0.08$ ,  $\rho'/\rho = 0.05$ . Пунктирные линии: поверхность и граница раздела в недеформированном состоянии.

В данной главе исследованы также локализованные волны в клине, состоящем из двух пуассоновских сред, которые имеют плоскую границу, с различными плотностями и с произвольными углами раствора. Получен график существования таких мод в координатах материальных параметров для различных углов клиньев. Дополнительно, для такой структуры исследован отклик на гармонический источник, а также существование в ней вытекающих клиновых волн.

Исследована задача распространения локализованных мод в усеченном клине, состоящем из трех сред. Построены графики дисперсионных кривых для подобных сложных структур и распределения их полей для первых четырех мод (рис. 10). Подробно исследованы вытекающие волны в данных сложных геометриях при учете внешнего источника.

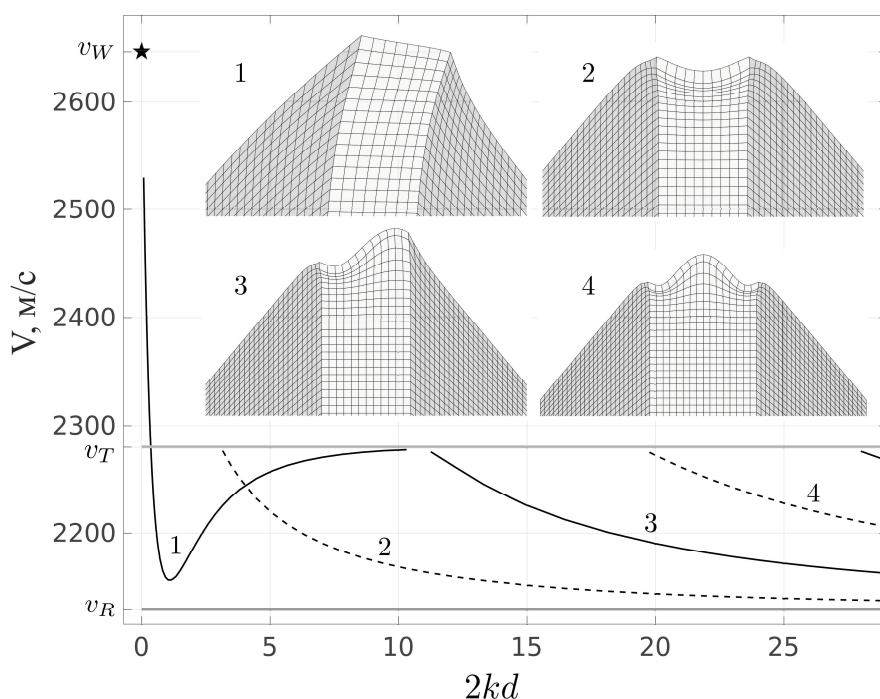


Рис. 10. Дисперсионные кривые волноводных нечетных (сплошной) и четных (пунктирной) мод в системе с  $\theta_1 = \theta_2 = 40^\circ$ , где среда 1 и 2: алюминий, среда 3: медь. Верхняя горизонтальная линия: скорость объемных поперечных волн в меди. Нижняя горизонтальная линия: скорость волны Рэлея в меди. Вставки: модели смещения в плоскости мод ветви 1 при  $2kd=3$ , ветви 2 при  $2kd=8$ , ветви 3 при  $2kd=15$  и ветви 4 при  $2kd=25$ .  $v_W$ : Скорость распространения клиновой волны в алюминиевом клине с углом раскрытия  $80^\circ$ .

Показано, что в спектрах мод, распространяющихся в структурах в виде края из силикона с жесткими границами, и такого же края, граничащего с четвертьпространствами из оргстекла, наблюдаются частотные диапазоны с отрицательными групповыми скоростями (рис. 11).

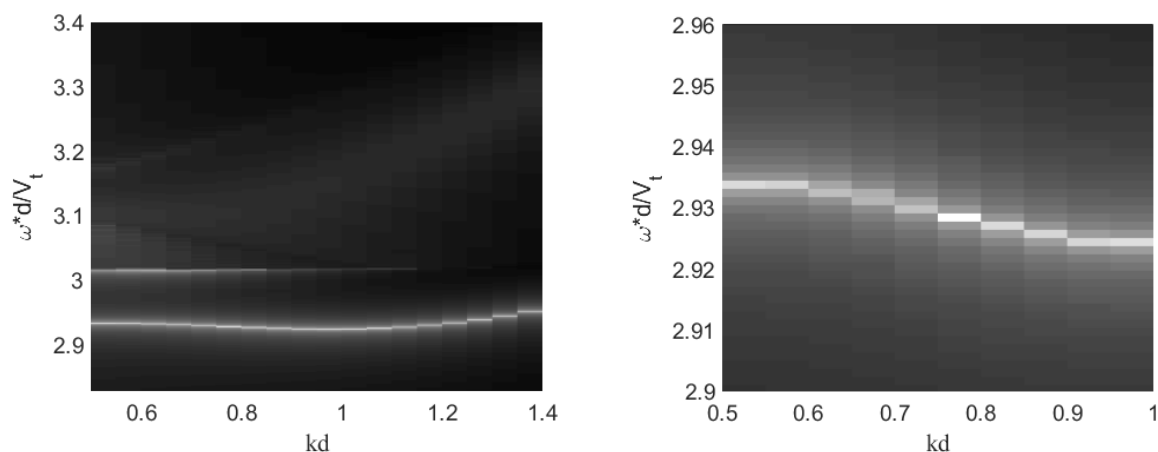


Рис. 11. Величина квадрата вектора смещения у поверхности среды 3 в структуре в виде полупространства из трех сред с  $\theta_1 = \theta_2 = 90^\circ$ , где среды 1 и 2: оргстекло, среда 3: силикон. Оттенки серого пропорциональны  $\log[\sum(U_1^2 + U_2^2 + U_3^2)]$ , где  $\sum(U_1^2 + U_2^2 + U_3^2)$  суммы по квадратам величин смещения всех узлов на поверхности среды 3 в МКЭ расчетах.

Видно характерное для обратной волны поведение дисперсионной кривой (рис. 11), заключающееся в уменьшении частоты при увеличении волнового числа. Схожее поведение спектра наблюдается у локализованных мод, распространяющихся в крае из силикона при замене четвертьпространств из оргстекла на жесткие граничные условия.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Итак, в результате проделанной работы заявленная цель была достигнута и все поставленные задачи были решены.

На основе численно рассчитанного спектра для акустических мод в пластине YX LiNbO<sub>3</sub> была найдена ветвь с отрицательной скоростью переноса энергии. С помощью данного спектра были оценены длины волн и частоты на которых мода Лэмба A<sub>1</sub> проходит участки с положительной и отрицательной групповой скоростями. По выбранным значениям длин волн проектировались встречно-штыревые преобразователи для резонатора на акустических модах в пластине. Это позволило достаточно точно возбуждать обратные моды Лэмба в эксперименте, исходя из задачи распространения. В дополнение к этому была составлена математическая модель для исследования возбуждения волн Лэмба с помощью метода конечных элементов в среде COMSOL. Сравнение двух теоретических подходов с экспериментальными измерениями показали их очень хорошее соответствие [A5, A11, A13].

С помощью аналитических методов были исследованы энергетические характеристики обратных вытекающих волн Лэмба при различных граничных условиях. Показано, что для обратных вытекающих волн Лэмба в изотропной пластине, погруженной в жидкость, усредненный по времени интегральный по глубине поток энергии вдоль направления распространения равен нулю.



Подробно исследован вопрос определения скорости переноса энергии в случае обратных вытекающих волн Лэмба. Построены дисперсионные зависимости для групповых и фазовых скоростей в случае присутствия в спектре обратных вытекающих волн Лэмба [А3, А10].

Была поставлена и решена задача о существовании чисто сдвиговых обратных волн в пластине ниобата калия. В случае, когда сдвиговая объемная волна распространяется в плоскости  $YX$ , то уравнения, описывающие данные объемные волны несвязанны с уравнениями для других поляризаций. Получены дисперсионные соотношения для сдвиговых волн в пластине со свободными и металлизированными граничными условиями. Далее данные уравнения исследуются асимптотически двумя способами. С одной стороны с помощью прямого разложения дисперсионных соотношений в ряды относительно точек зарождения мод, а с другой стороны с помощью теории возмущений основанной на дивергентном соотношении. В результате получены зависимости частоты от волнового числа до второго порядка включительно. В данном выражении коэффициенты при каждом члене отвечают за свой вклад в дисперсию мод. Видно, что в таком представлении есть коэффициент при квадратичном члене разложения, который показывает влияние кривизны поверхности медленности. Данный член вносит основной вклад в существование обратных сдвиговых волн. Также в этом выражении есть коэффициент, при линейном члене описывающий взаимодействие с границей. А именно, что плоская сдвиговая волна при отражении от границы пьезоэлектрик/вакуум имеет отрицательный сдвиг фазы [А1, А4, А7, А8, А9].

В продолжение исследования распространения сдвиговых обратных волн в ниобате калия рассматривалась задача влияния граничных условий на спектр данных волн. Показано, что проводящие тонкие слои, помещенные на обе поверхности пластины, проводимость которых изменяется от  $10^{-8}$  См/см (свободная пластина) до 1 См/см (закороченная пластина), существенно влияют на поведение спектра и распределение полей волн. Например, при электрическом закорачивании пластины с обеих сторон обратная  $SH_1$  волна становится прямой. С другой стороны, несимметричная проводимость относительно центра позволяет практически произвольным образом влиять на распределение, как смещений, так и электрического потенциала волны по толщине пластины [А2, А6, А12].

В рамках диссертационной работы было проведено теоретическое исследование локализованных мод в волноводах сложной формы. Данная задача решалась с помощью полуаналитического метода конечных элементов. Исследовались моды, распространяющиеся на границе двух сред образующих вместе либо клин, либо полупространство. Получено, что по такой границе распространяются локализованные волны в виде аналога волн Рэлея-Стоунли. Также в работе исследовались волны, бегущие по границе геометрии, состоящей из трех сред, похожей на усеченный клин. В данном волноводе существуют локализованные моды, у которых с увеличением номера моды растет число длин волн укладывающихся по среднему слою. Для данной геометрии также исследовалась задача возбуждения. Показано наличие в ней

вытекающих в центральную среду волн. Ограниченность геометрии в методе конечных элементов накладывает требования для применения специальных граничных условий, которые гасят уходящие на бесконечность волны [A14, A15].

Показано, что у дисперсионных кривых мод волноводов в виде края из искусственного каучука с жесткими границами и такого же края, граничащего с двумя четвертьпространствами из оргстекла, существуют ветви с частотными диапазонами, соответствующие обратным акустическим волнам.

## **СПИСОК РАБОТ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

- A1. Кузнецова И.Е., Недоспасов И.А., Можяев В.Г. SH-волны с нулевой скоростью переноса энергии в пластине из сверхсильного пьезоэлектрика  $\text{KNbO}_3$  // Нелинейный мир. 2015. № 13 (2). С. 30.
- A2. Kuznetsova I.E., Nedospasov I.A., Zaitsev B.D., Kuznetsova A.S. Influence of conductive and viscous liquid on the properties of the Bleustein-Gulyaev wave in potassium niobate crystal // 2016 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS). 2016. 4 pp.
- A3. Nedospasov I.A., Mozhaev V.G., Kuznetsova I. E. Leaky backward Lamb waves in various isotropic and anisotropic plate/liquid systems // 2016 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS). 2016. 4 pp.
- A4. Кузнецова И. Е., Можяев В. Г., Недоспасов И. А. Чисто сдвиговые обратные волны в пьезоэлектрических пластинах ниобата калия X- и Y-срезом // Радиотехника и электроника. 2016. № 61 (11). С. 1122.
- A5. Mozhaev V. G., Nedospasov I. A., Kuznetsova I. E. Backward acoustic plate waves: Features of properties and possible applications in microelectronic devices // 2017 Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium (EFTF/IFCS). 2017. P. 850.
- A6. Kuznetsova I. E., Nedospasov I.A., Qian Z., Wang B., Zhu F. Control of acoustic field of backward acoustic waves in piezoelectric plates // 24th International Congress on Sound and Vibration (ICSV24). 2017. 1 p.
- A7. Mozhaev V.G., Nedospasov I.A., Kuznetsova I.E. Application of perturbation theory to the problem of existence of backward Lamb waves // International Conference «Days on Diffraction 2017», Abstract book. St. Petersburg: POMI. 2017. P. 101.
- A8. Nedospasov I., Mozhaev V., Kuznetsova I. Mechanisms of appearance of backward shear-horizontal waves in potassium niobate plates // 2017 IEEE International Ultrasonics Symposium. Abstract Book. 2017. P. 184.
- A9. Недоспасов И.А., Можяев В.Г., Кузнецова И.Е. Изучение обратных сдвиговых волн в пьезоэлектрических пластинах кристаллов класса 2mm на основе асимптотического разложения дисперсионных уравнений // Учен. зап. физ. фак-та Моск. ун-та. 2017. № 5. С. 1751308.
- A10. Nedospasov I.A., Mozhaev V.G., Kuznetsova I.E. Unusual energy properties of leaky backward Lamb waves in a submerged plate // Ultrasonics. 2017. V. 77. P. 95.

- A11. Kuznetsova I. E., Nedospasov I. A., Kuznetsova A. S. Forward and Backward Acoustic Waves in Crystals with High Piezoactivity and Dielectric Permittivity // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2018. № 82 (5). P. 476.
- A12. Kuznetsova I. E., Nedospasov I. A., Kolesov V. V., Qian Z., Wang B., Zhu F. Influence of electrical boundary conditions on profiles of acoustic field and electric potential of shear-horizontal acoustic waves in potassium niobate plates // *Ultrasonics*. 2018. № 86. P. 6.
- A13. Zaitsev B., Kuznetsova I., Nedospasov I., Smirnov A., Semyonov A. New approach to detection of guided waves with negative group velocity: Modeling and experiment // *Journal of Sound and Vibration*. 2019. № 442. P. 155.
- A14. Pupyrev P. D., Nedospasov I. A., Mayer A. P. Guided acoustic waves at the intersection of interfaces and surfaces // *Ultrasonics*. 2019. № 95. P. 52.
- A15. Пупырев П. Д., Недоспасов И.А., Майер А.П. Волноводные акустические моды в сложных структурах клиново-кромочного типа // *Нелинейный мир*. 2019. № 2. С. 36.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tolstoy I., Usdin E. Wave propagation in elastic plates: Low and high mode dispersion // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1957. № 29. P. 37.
2. Meitzler A.H. Backward-wave transmission of stress pulses in elastic cylinders and plates // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1965. V. 38. №. 5. P. 835.
3. Wolf J., Ngoc T.D.K., Kille R., Mayer W.G. Investigation of Lamb waves having a negative group velocity // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1988. V. 83. №. 1. P. 122.
4. Shuvalov A.L., Poncelet O. On the backward Lamb waves near thickness resonances in anisotropic plates // *Int. J. Sol. Str.* 2008. V. 45. № 11-12. P. 3430.
5. Бурлий П.В., Ильин П.П., Кучеров И.Я. О возможности существования поперечных обратных волн в пластинах // *Письма в ЖТФ*. 1982. Т. 8. №. 9. С. 568.
6. Бурлий П.В., Ильин П.П., Кучеров И.Я. Обратные поперечные акустические волны в пластинах кубических кристаллов // *Акуст. журн.* 1997. Т. 43. № 3. С. 310.
7. Yantchev V., Arapan L., Katardjiev I., Plessky V. Thin-film zero-group-velocity Lamb wave resonator // *Appl. Phys. Lett.* 2011. V. 99. P. 033505.
8. Prada C., Balogun O., Murray T.W. Laser-based ultrasonic generation and detection of zero-group velocity Lamb waves in thin plates // *Appl. Phys. Lett.* 2005. V. 87. P. 194109.
9. Germano M., Alippi A., Bettucci A., Mancuso G. Anomalous and negative reflection of Lamb waves in mode conversion // *Phys. Rev. B*. 2012. V. 85. №. 1. P. 012102.
10. Lomonosov A.M., Hess P., Mayer A.P. Silicon edges as one-dimensional waveguides for dispersion-free and supersonic leaky wedge waves // *Appl. Phys. Lett.* 2012. V. 101. P. 031904.

11. Коробов А.И., Агафонов А.А., Изосимова М.Ю. Нелинейные упругие волны в твердотельном изотропном клине с дефектами // ЖТФ. 2018. Т. 88. № 3. С. 385.
12. Sokolova E.S., Kovalev A.S., Maznev A.A., Mayer A.P. Acoustic waves guided by the intersection of a surface and an interface of two elastic media // Wave Motion. 2012. V. 49. P. 388.