

906

1

**ТАГАНРОГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

На правах рукописи

УДК 621.396,677,73

**ЗАГРАЙ Николай Петрович**

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ И МЕТОДОВ  
НЕЛИНЕЙНОЙ АКУСТИКИ  
СЛОИСТО-ДИСКРЕТНЫХ И НЕОДНОРОДНЫХ СРЕД**

Специальность 01.04.06. - АКУСТИКА

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Таганрог 1999

к

Работа выполнена в Таганрогском государственном радиотехническом университете

Научный консультант: д.т.н., профессор, действительный член РАЕН Тимошенко В.И.

**Официальные оппоненты:**

Доктор физико-математических наук,  
профессор Коробов А.И.

Доктор технических наук,  
старший научный сотрудник, Глазанов В.Е.

Доктор физико-математических наук,  
профессор Рыжов В.П.

Ведущая организация – НИИ «БРИЗ», г. Таганрог

Защита состоится " 10 " июня 1999 г. в 14 часов  
на заседании диссертационного совета Д 063.13.04  
Таганрогского государственного радиотехнического университета.  
Адрес: 347928, ГСП-17а, г. Таганрог, Ростовской области,  
пер. Некрасовский, 44.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан " 17 " 04 1999 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

к.т.н., доцент Старченко И.

**ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность темы диссертации.** Развитие и совершенствование гидроакустических средств исследований, навигации, лоцирования, классификации объектов и проведение экологического мониторинга водных акваторий непрерывно стимулирует внедрение и использование новых акустических явлений и методов на основе нелинейной акустики. Результаты теоретических и прикладных исследований с применением методов нелинейной акустики позволили разработать физические модели теоретических расчётов и описаний основных параметров и условий работы акустических параметрических антенн (АПА), а также сформировать совокупность инженерных методик, приемов и методов реализации принципов нелинейной акустики в прикладных разработках по проектированию и конструированию приборов и средств нелинейной гидроакустики. Эксплуатация ряда нелинейных акустических приборов доказала их эффективность по обеспечению высокой направленности излучения при малой базе первичных излучателей, широкополосности, повышенной проникающей способности в морские донные отложения и т.д.

Внедрение параметрических режимов в серийные рыболокаторы «Сарган», «Пескарь» и проектируемые гидроакустические приборы обуславливает для гидроакустических антенн необходимость рассмотрения условий нелинейных взаимодействий в случаях реальных конструкций антенных решеток и обтекателей, где реализуются слоисто-дискретные системы. При этом важной инженерной задачей становится сохранение при работе в таких конструкциях параметров вторичных полей АПА, измеренных и наблюдаемых в модельных экспериментальных условиях. Дальнейшее расширение практического использования АПА в океанологических исследованиях при различных условиях состояния водной среды и лоцирования малогабаритных естественных и искусственных препятствий, рассеивателей и объектов низкочастотным полем АПА волн разностной частоты (ВРЧ) обу-

славливает необходимость решения задач, разработки моделей описания и рассмотрения условий формирования характеристик АПА в условиях неоднородных области нелинейного взаимодействия (НОНВ) первичных полей накачек. При этом такими неоднородностями в первую очередь становятся слоистые системы в области нелинейного взаимодействия (ОНВ), границы различных форм и видов, совокупности границ, отдельные слои, системы слоев, а также в общем случае неоднородные включения (тела) в ОНВ АПА: прежде всего простых геометрических форм - сфер и цилиндров.

Структура поля АПА и ее характеристики направленности (ХН) существенно зависят от структуры ОНВ, в общем случае - от формы и видов неоднородностей в объеме ОНВ: слоев, границ раздела, рассеивателей и т.д. Определение уровней, структуры и направленности вторичных полей с такими сложными ОНВ необходимы для разработки методов инженерного расчета и анализа изменения ХН АПА, работающих в действующих технических конструкциях гидроакустических антенных систем и обтекателях, в реальных условиях состояния водной среды: вертикального распределения скорости звука (ВРСЗ), тонкой горизонтальной структуры водной среды, плавного изменения основных параметров водной среды в зависимости от различных условий, для получения информации о таких изменениях и обработке результатов измерений.

В результате актуальными становятся задачи разработки моделей и методов нелинейной акустики для описания процессов и условий формирования полей АПА при нелинейном взаимодействии волн в различных слоистых (жидкостных и твердотельных), слоисто-дискретных и неоднородных средах, представляющих собой однородные среды с включениями в виде сферических и цилиндрических рассеивателей для последующего практического применения результатов в расчетах полей в приборах нелинейной гидроакустики и нелинейных устройствах твердотельной акустики.

Целью диссертационной работы являются разработка моделей и методов нелинейной акустики для теоретических и экспериментальных исследо-

ваний нелинейных эффектов при распространении и взаимодействии акустических волн в слоисто-дискретных средах и средах с границами раздела в области нелинейного взаимодействия (ОНВ), а также в средах, содержащих сферические и цилиндрические рассеиватели, для описания основных параметров АПА и разработки принципов построения аппаратуры с использованием нелинейных эффектов для создания различных акустических устройств и систем с АПА.

Задачами диссертационной работы являются: исследования нелинейных взаимодействий акустических волн в средах со слоисто-дискретными областями нелинейного взаимодействия (ОНВ), включающими такие неоднородности среды распространения как слои, границы раздела и рассеиватели в виде сфер и цилиндров, а также влияния нелинейных свойств сред и граничных условий на формирование генерируемых вторичных полей волн комбинационных частот (ВКЧ).

Исследования направлены на разработку моделей и методов нелинейной акустики для разработки инженерных методов анализа и расчета полей АПА, рекомендаций по определению изменения вида ХН АПА при изменении форм различного рода перегородок в ОНВ первичных полей; установления степени влияния обтекателей на пространственные характеристики АПА в процессе их проектирования, принципов построения технических твердотельных устройств обработки сигналов гидроакустических систем, параметрических эхолокаторов для дистанционного определения концентрации свободного газа в жидкости с использованием нелинейных взаимодействий акустических волн и создания устройств нелинейной гидроакустики и нелинейной твердотельной акустики.

Методика исследований. Поставленная в работе цель автором достигается теоретическими и экспериментальными исследованиями в области разработки, апробации и использования различных моделей описания нелинейных взаимодействий в поле АПА при различных условиях. На основе

разработанных физических и математических моделей нелинейной акустики с соответствующими приближениями и оценками получены обобщенные выводы и положения, обоснованные теоретическими расчетами и их сравнением в частных случаях с известными результатами. Экспериментальным исследованиям, осуществлявшимся в различных условиях, при их проведении уделялось внимание проверке достоверности исследований путем сравнения результатов исследований с теоретическими моделями и результатами, полученными другими методами.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований составили основу рекомендаций и принципов построения гидроакустической аппаратуры и твердотельных акустических устройств.

#### Научная новизна диссертации состоит в следующем:

- впервые решена задача определения направленности АПА с системой слоев в ОНВ с учетом и без учета затухания первичных полей накачек, построены модели анализа направленности АПА по акустическим линейным и нелинейным параметрам сред слоистых систем;
- разработан метод решения задачи формирования направленности АПА в слоистой структуре области нелинейного взаимодействия с размытыми границами;
- предложена модель определения направленности АПА при плавном вертикальном изменении скорости звука (ВРСЗ) в среде нелинейного взаимодействия;
- решена задача определения направленности АПА с тонкой структурой ОНВ дискретного изменения скорости звука как системы горизонтальных слоев;
- решена задача формирования поля излучающих акустических параметрических антенн (АПА) с границами раздела различного вида в области нелинейного взаимодействия (ОНВ) и сравнение теоретических результатов с экспериментальными исследованиями;

- предложена методика описания многоэлементных акустических параметрических антенн как совокупности линейных систем излучателей первичных полей накачек;
- уточнены основные соотношения между параметрами акустической волны во втором приближении с учетом нелинейных и диссипативных членов из системы основных уравнений акустики с учетом квадратичной (четной) и кубической (нечетной) нелинейностей в жидких средах при нелинейном взаимодействии для рассмотрения задач описания процессов распространения и отражения по вторичным акустическим полям волн комбинационных частот;
- предложено рассмотрение ускорения как динамической характеристики нелинейного взаимодействия в рамках методики исследования динамики искажений профиля плоских акустических волн конечной амплитуды с учетом квадратичной и кубической нелинейностей;
- решена задача получения спектральных коэффициентов разложения Фурье с учетом вкладов нелинейностей второго и третьего приближений;
- разработана модель рассмотрения нелинейных явлений в твердотельном акустическом резонаторе в условиях импульсного возбуждения с учетом влияния нелинейных свойств его среды на изменения фазовых соотношений при внутреннем переотражении от границ;
- решена задача и проведены экспериментальные исследования механизма влияния колебаний доменных стенок на нелинейные свойства сегнетоэлектрических кристаллов;
- впервые разработаны модели и решены задачи по описанию процессов формирования рассеянных полей на объектах сферической и цилиндрической формы в ОНВ АПА при нелинейном взаимодействии падающих первичных полей накачки и результаты экспериментальных исследований рассеянных вторичных полей волн комбинационных частот поля АПА;
- использовано уточненное уравнение движения газовой полости в жидкости с учетом квадратичной и кубической нелинейностей для описания

процессов распространения и нелинейных взаимодействий акустических волн в жидких газонаполненных средах;

- получены результаты экспериментальных исследований поля нелинейного акустического твердотельного резонатора пьезополупроводникового кристалла InSb в импульсном режиме;

- получены результаты экспериментальных исследований поля АПА при наличии в ОНВ АПА жидких и твердотельных слоев, их комбинаций, а также рассеивателей в виде сферы и неровных поверхностей;

- предложены принципы построения технических твердотельных устройств обработки сигналов гидроакустических систем и параметрических эхолокаторов для дистанционного определения концентрации свободного газа в жидкости с использованием нелинейных взаимодействий акустических волн;

- выработаны рекомендации по определению изменения вида ХН АПА при изменении форм различного рода перегородок в ОНВ первичных полей и установления степени влияния обтекателей на пространственные характеристики АПА в процессе их проектирования.

**Научная и практическая значимость работы состоит** в нового научно-направления "Разработка моделей и методов нелинейной акустики слоисто-дискретных и неоднородных сред" для решения важных прикладных инженерно-технических народнохозяйственных задач в области гидроакустики, океанотехники и приборостроения с помощью приборов нелинейной гидроакустики и твердотельных устройств нелинейной акустики.

Разработанные и предложенные модели и методы позволяют получить новые решения задач описания и расчета полей акустических параметрических антенн и их характеристик направленности (ХН) в зависимости от структуры области нелинейного взаимодействия в общем случае - от форм и видов неоднородностей в объеме ОНВ: слоев, границ раздела, рассеивателей и т.д.

Результаты позволили для реальных условий состояния водной среды (наличие системы нормальных слоев в ОНВ, вертикального распределения скорости звука (ВРСЗ), тонкой горизонтальной структуры водной среды, плавного пространственного изменения основных параметров водной среды и др., установить основные закономерности и степень изменения основных характеристик акустических параметрических антенн в случаях неоднородных областей нелинейного взаимодействия, расширить использование методов нелинейной акустики для описания процессов рассеяния при нелинейных взаимодействиях для разработки дистанционных акустических методов исследований.

Полученные в аналитические, численные и модельные решения в технических приложениях позволили разработать методы инженерного расчета и анализа изменения ХН АПА, работающих в действующих и проектируемых технических конструкциях гидроакустических антенн и обтекателей.

Для твердотельных устройств типа резонаторов с однородной и структурно-изменяющейся средой показано влияние границ и доменной структуры сегнетоэлектрических кристаллов при повышенных уровнях первичных сигналов, что является проявлением новых механизмов нелинейных взаимодействий и обоснована необходимость их учета при создании и проектировании новых нелинейных твердотельных акустических устройств.

В случае жидких сред с естественными и искусственными включениями (рассеивателями) сферической и цилиндрической формы разработан новый подход в решении задач рассеяния в нелинейной акустики.

Результаты существенно расширили представления о физических явлениях для процесса рассеяния при нелинейном взаимодействии и позволили обеспечить получение информации об самих рассеивателях для всего спектра волн комбинационных частот акустических параметрических антенн, а также выработать принципы технических реализаций для построения параметрических эхолокаторов дистанционного определения концентрации свободного газа в жидкостях.

На защиту выносятся следующие теоретические исследования и практически установленные научные результаты:

1. Методы определения направленности АПА с системой дискретных слоев с учетом и без учета затухания первичных полей накачек, с размытыми границами слоев, а также построение моделей анализа направленности АПА по акустическим линейным и нелинейным параметрам сред слоистой системы.

2. Модели описания направленности АПА при плавном ВРСЗ в среде нелинейного взаимодействия, с тонкой структурой ОНВ дискретного изменения скорости звука как системы горизонтальных слоев, с границами раздела различного вида, построение моделей анализа направленности АПА по акустическим линейным и нелинейным параметрам сред слоистой системы, рассмотрения нелинейных явлений в твердотельном акустическом резонаторе в условиях импульсного возбуждения с учетом влияния нелинейных свойств его среды на изменения фазовых соотношений при внутреннем переотражении от границ, модели описания процессов рассеяния плоских волн на объектах сферической и цилиндрической формы в ОНВ АПА при нелинейном взаимодействии падающих первичных полей накачки, результаты экспериментальных исследований и сравнение теоретических результатов с экспериментальными исследованиями.

3. Решение задач определения направленности АПА (поперечного распределения поля) с системой слоев в ОНВ с учетом и без учета затухания первичных полей накачки, с тонкой структурой ОНВ дискретного изменения скорости звука как системы горизонтальных слоев, с границами раздела различного вида в ОНВ, получения спектральных коэффициентов разложения Фурье в учет вкладов нелинейностей второго и третьего приближений, механизма влияния колебаний доменных стенок на нелинейные свойства сегнетоэлектрических кристаллов, описания процессов формирования рассеянных полей волн комбинационных частот на объектах сферической и цилиндрической формы в ОНВ АПА при нелинейном взаимодействии падающих первичных полей накачки.

4. Методика описания многоэлементных акустических параметрических антенн как совокупности линейных систем излучателей первичных полей накачки, рассмотрения ускорения как динамической характеристики нелинейного взаимодействия в исследовании динамики искажения профиля плоских акустических волн конечной амплитуды с учетом квадратичной и кубической нелинейностей.

5. Уточнение основных соотношений между параметрами акустической волны во втором приближении с учетом нелинейных и диссипативных членов из основных уравнений акустики с учетом квадратичной (четной) и кубической (нечетной) нелинейностей в жидких средах при нелинейном взаимодействии для рассмотрения задач описания процессов распространения и отражения по вторичным акустическим полям волн комбинационных частот, уравнений движения газовой полости в жидкости с учетом квадратичной и кубической нелинейностей для описания процессов распространения и нелинейных взаимодействий акустических волн в жидких газонаполненных средах.

6. Результаты экспериментальных исследований поля АПА при наличии в ОНВ АПА жидких и твердотельных слоев, их комбинаций, поля нелинейного акустического твердотельного резонатора пьезополупроводникового кристалла InSb в импульсном режиме, полей волн накачки и комбинационных частот АПА при рассеянии на сферах и неровных поверхностях.

7. Принципы построения твердотельных устройств обработки сигналов гидроакустических систем, параметрических эхолотаторов для дистанционного определения концентрации свободного газа в жидкости с использованием нелинейных взаимодействий акустических волн и инженерные методы расчета характеристик направленности АПА при изменении форм перегородок в ОНВ первичных полей и установления степени влияния обтекателей на пространственные характеристики АПА в процессе их проектирования.

**Реализация результатов работы.** Разработанные в диссертации модели, методы, алгоритмы, полученные результаты и выводы использовались в хозяйственных НИР и ОКР. Научные и практические результаты диссертации внедрены на предприятиях НПО "Южморгеология" (г.Геленджик), НПП "Янтарь-комплекс" (г.Калининград) при проектировании, разработке, испытании макетов и образцов гидроакустической аппаратуры, проведении модельных и натурных измерений. Научные и практические результаты, полученные в диссертации и представленные в публикациях и научных отчетах, используются в учебном процессе при подготовке студентов в Таганрогском государственном радиотехническом университете.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы были представлены: на IX Всесоюзном совещании по сегнетоэлектричеству, Ростов-на-Дону, 1979 г.; на III Всесоюзном научно-техническом совещании "Нелинейная гидроакустика", Таганрог, 1983 г.; на 12 International Congres on Acoustics, Toronto, Canada, 1986 г.; на 3-й научно-технической конференции "Комплексные геолого-геофизические исследования Мирового океана", Геленджик, 1988 г.; на 2-м Всесоюзном Акустическом семинаре "Модели, алгоритмы, принятие решений", Москва, 1988 г.; на VII научно-технической конференции молодых ученых и специалистов, Москва, 1988 г.; на Всесоюзном симпозиуме "Акустическая кавитация и проблемы интенсификации технологических процессов", Одесса, 1989 г.; на X Всесоюзной конференции "Информационная акустика", Москва, 1990 г.; на конференции "Проблемы метрологии гидрофизических измерений" Москва, 1992 г.; на II International scientific-technical conference "Current problems of fundamental sciences". Moscow. 1994 г.; на II Всероссийской научно-технической конференции "Техническая кибернетика, радиоэлектроника и системы управления", Таганрог, 1994 г.; на XVI Всероссийской конференции с международным участием "Акустоэлектроника и физическая акустика твердого тела", Сыктывкар, 1994 г.; на Всероссийской научно-технической конференции "Медицинские информационные системы", Таганрог, 1995 г.;

Международной конференции "Фундаментальные и прикладные проблемы охраны окружающей среды", Томск, 1995; на Третьей Международной научно-технической конференции "Актуальные проблемы электронного приборостроения", Новосибирск, 1996г.; на III Всероссийской научно-технической конференции с между народным участием "Теория цепей и сигналов", Таганрог, 1996 г.; на научно-технической конференции "Радио и волоконно-оптическая связь, локация и навигация", Воронеж, 1997 г.; на II Всероссийской научно-технической конференции "Методы и средства измерений физических величин", Нижний Новгород, 1997г.; на 3 International Conference "Physics and Radioelectronics in Medicine and Biotechnology", ФРЭМБ-98, Владимир, 1998 г.; на Fifth International Conference "Remote Sensing for Marine and Coastal Environments", San Diego, California, USA, 1998; на XXIX -XLIV научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава, аспирантов и сотрудников ТРТУ, Таганрог, 1979-1998 г.г.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 61 научные работы, в том числе 2 монографии, 57 статей и тезисов докладов, 2 изобретения. Кроме того автор принимал участие в выполнении ряда научно-исследовательских работ по теме диссертации, по которым в ВИНТИ зарегистрировано 7 научно-технических отчетов.

**Личный вклад автора.** Все исследования, представленные в работе, выполнены автором в основном самостоятельно.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 296 наименований, одного приложения. Работа содержит 389 страниц машинописного текста и 143 рисунка.

Работа выполнена по программе "Research Program in Integrated Optics" (Italia, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Universita "La Sapienze", Istituto di Acustica "O.M. Corbino", 1985) и по гранту № 93-02-14878 Российского Фонда Фундаментальных Исследований.

### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

**Во введении** обосновывается актуальность темы исследований, сформулирована цель работы, кратко изложено содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** исследуются вопросы нелинейных взаимодействий акустических волн в слоисто-дискретных средах в поле АПА. Предложена модель описания нелинейных взаимодействий в нормальных дискретных плоскопараллельных слоях в ОНВ с учетом различных условий для первичных полей накачки (с затуханием, без затухания и их вариации), из которой для амплитуд звуковых давлений ВКЧ следует

$$A_{\pm} = -\frac{1}{4\pi} \sum_{i=1}^m \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A_{1i}(x', y') \cdot A_{2i}(x', y') e^{\frac{jk_i}{r_0}(xx'+yy')} dx' dy' \times \right. \\ \left. \times \int_{l_{i-1}}^{l_i} \frac{\varepsilon_i \Omega^2}{C_{0i}^4 \rho_{oi}} \cdot \frac{e^{-jk_i r_0}}{r_0} \Phi_{1i}(z') \cdot \Phi_{2i}(z') e^{-jk_i(1-z'/r_0)} dz' \right\},$$

где преобразование по Фурье произведений функций, описывающих изменение амплитуд высокочастотных волн в поперечном сечении пучка при поперечных  $A_{1,2i}(x', y')$  распределениях двухчастотного первичного поля

$D_{ii} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A_{1i}(x', y') \cdot A_{2i}(x', y') \cdot e^{-ik_i r_0 (xx'+yy')} dx' dy' = \tilde{A}_1 * \tilde{A}_2$ , и продольных  $\Phi_{1,2i}(z')$ , определяющих форму и ширину ХН поля ВКЧ при изменении структуры ОНВ в направлении распространения первичных полей накачки

$D_{ii} = \int_0^{\infty} \Phi_{1i}(z') \Phi_{2i}(z') e^{-ik_i(1-z'/r_0)} dz'$ ,  $\rho_{oi}$ ,  $C_{oi}$ ,  $\varepsilon_i$ ,  $k_i$  - соответственно плотность, скорость распространения звука, нелинейный параметр квадратичной нелинейности, волновое число ВКЧ для среды  $i$ -того слоя,  $r_0$  - расстояние до точки наблюдения,  $x', y', z'$  - координаты вторичных источников.

Представлены исследования динамики изменения структуры поля АПА со слоисто-дискретной системой в области нелинейного взаимодействия. Полученные результаты для различных условий и случаев реализованы в численном моделировании структуры вторичного поля АПА и установлены основные закономерности его формирования. Выработаны рекомендации и инженерные методы расчета и управления ХН АПА со слоистой структурой ОНВ в зависимости от физических свойств контактирующих слоев и их протяженностей. С применением метода погружения решена задача для случая слоистых структур с размытыми границами в ОНВ, для которых изменения основных параметров рассматриваются как  $\rho = \rho_0 + \rho_1 \cdot \cos(z'/a)$ ,  $C = C_0 + C_1 \cdot \cos(z'/a)$ ,  $\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_1 \cdot \cos(z'/a)$ , где  $a$  - пространственный период изменения свойств среды, учитывающий ее неоднородность в направлении распространения  $z$ . Получены результаты по описанию поля АПА в условиях изменений скорости звука с различных пространственным периодом, при этом для малых его значений имеет место наличие дополнительного уровня бокового поля АПА. При больших значениях пространственного периода условия формирования поля АПА соответствуют случаям слоисто-дискретной структуры в ОНВ. В условиях наличия скачка скорости и ее изменения в тонкой дискретной горизонтальной структуре в среде нелинейного взаимодействия рассмотрена задача и предложен общий подход исследования и учета влияния горизонтальных слоев на направленность АПА. В случаях плавного изменения вертикального распределения скорости звука (ВРСЗ) в области нелинейного взаимодействия  $C(y') = C_0(1 + \alpha y')^{-1/2} = C_0 \left(1 + \frac{\alpha}{2} y'\right)^{-1}$ , где  $y'$  - координата, ортогональная направ-



лению распространения волн накачки,  $C_0$  - скорость звука у поверхности,  $\alpha$  - постоянный коэффициент, разработана общая модель описания влияния ВРСЗ на направленность АПА. На основе предложенных моделей описаны и рассмотрены условия работы системы «АПА-акустический обтекатель», разработан экспериментальный стенд и приведены исследования поля АПА при наличии в ОНВ слоя, пластин и системы слоев.

Результаты первой главы позволяют использовать предложенные модели и методы инженерного расчета для определения динамики изменения поля АПА в условиях изменения структуры ОНВ как за счет естественных условий в самой среде, так и в случае построения технических реализаций приборов, использующих явления и принципы нелинейной акустики.

Во второй главе рассматриваются модели и методы описания поля акустической параметрической антенны с границами раздела сред в области нелинейного взаимодействия, что имеет место при работе АПА в технических конструкциях через борт и согласующие промежуточные среды. Предложена модель жидкостного акустического резонатора с полупрозрачной плоскопараллельной границей для описания формируемых полей АПА как в первой среде, так и во второй. Приведены результаты исследований для условий акустически мягких и жестких границ. Указаны особенности формирования амплитудных и фазовых зависимостей осевых распределений полей вторичных полей на примере второй гармоники при различных условиях. Для описания работы АПА в реальных условиях при лоцировании в грунт, когда граница раздела «вода-грунт» ограничивает ОНВ АПА по полю волн накачки, разработана общая модель описания изменения направленности поля АПА поверхностей ограничения различных видов: плоских наклонных, наклонных шероховатых, криволинейных и др. через функцию описания формы поверхности в общем виде  $f(y)$ :

$$P(x, y, z, t) = \frac{D}{r_0} A_F \int_{-\frac{1}{2}a}^{+\frac{1}{2}a} \int_0^a \int_0^{f(y')} \cos(\alpha + \beta x' + \gamma y') dx' dy' dz' = \\ = \frac{DA_F b}{r_0} \left\{ \frac{1}{\beta \gamma} [\cos(\alpha + \gamma a) - \cos \alpha] + \frac{1}{\beta} \int_0^a \sin[\alpha + \beta f(y') + \gamma y'] dy' \right\},$$

$$\text{где } D = -\frac{2+B/A}{8\pi\rho_0 C_0^4}, \quad A_{(\omega_1 \pm \omega_2)} = (\omega_1 \pm \omega_2)^2 P_1 P_2, \quad A_{2\omega_{1,2}} = 2\omega_{1,2}^2 P_{1,2}^2, \quad \alpha_{2\omega_{1,2}} = 2\omega_{1,2} \left( t - \frac{r_0}{C_0} \right),$$

$$\alpha_{(\omega_1 \pm \omega_2)} = (\omega_1 \pm \omega_2) \left( t - \frac{r_0}{C_0} \right), \quad \beta_i = \frac{2\pi}{\lambda_i} (\cos \Theta - 1), \quad \gamma_i = \frac{2\pi}{\lambda_i} \sin \Theta, \quad \Theta - \text{угол, } (a, b) -$$

линейные размеры прямоугольного излучателя.

Получены изменения характеристик направленности (ХН) АПА в виде их асимметрии относительно направления распространения, рассмотрена динамика изменения ХН в зависимости от углов наклона и видов поверхностей ограничения. Результаты использованы для расчетов характеристик направленности АПА при различных условиях и позволяют проводить оценки изменений направленности АПА для использования их в обработке результатов измерений и исследований. Для наклонного падения на границу раздела сред рассмотрено преломление звукового пучка. Показано влияние фактора фокусировки изменение его поперечного размера в зависимости от параметров контактирующих сред и величин углов падения. Для коэффициентов отражения и преломления получены выражения с учетом фактора фокусировки. Для акустической параметрической антенны предложен метод рассмотрения ее как системы прямоугольных излучателей, что является важным для инженерных расчетов при проектировании таких систем. Получены общие выражения, позволяющие в рамках рассматриваемой модели, делать инженерные оценки условий формирования поля АПА. Для исследований влияния присутствия границ раздела сред в области нелинейного взаимодействия АПА разработан экспериментальный стенд, моделирующий условия работы АПА и приведены выполненные исследования.

Результаты второй главы позволяют использовать в действующих и проектируемых гидроакустических системах предложенные модели для опи-

сания динамики изменения ХН АПА при полупрозрачных границах в ОНВ, при ограничении ОНВ различными видами поверхностей, с оценкой изменений параметров первичного поля АПА по фактору фокусировки при наклонном падении на границу раздела и рассмотрением предложенной модели описания поля АПА как системы излучателей.

**В третьей главе** проводятся теоретические и экспериментальные исследования нелинейных явлений высших порядков при взаимодействии акустических волн. На практике режимы работы АПА характеризуются значениями величин чисел Рейнольдса  $Re \gg 1$ . При этом возникает необходимость исследований эффектов третьего порядка малости для мощного первичного акустического поля, в сравнении их с эффектами второго приближения, нахождении общности и различий в характере их вкладов в процесс нелинейного взаимодействия. Рассмотрены уравнения состояния с членами высших порядков, включая четвертый. Определена связь параметра кубической нелинейности с коэффициентами разложения уравнения состояния и проведена оценка вклада величины нечетной (кубической) нелинейности. Представлены уравнения непрерывности и уравнения движения общего вида, позволяющие получить волновые уравнения в третьем и четвертом приближениях.

Получены выражения основных соотношений между акустическими величинами во втором и третьем приближениях

$$P_{(2)} = \rho_0 C_0 V_{(2)} + \frac{\rho_0}{2} \varepsilon V_{(1)}^2 - \frac{b}{2C_0} \frac{\partial V_{(1)}}{\partial x}, \quad V_{(2)} = \frac{P_{(2)}}{\rho_0 C_0} - \frac{\varepsilon}{2\rho_0^2 C_0^3} P_{(1)}^2 - \frac{b}{2\rho_0^2 C_0^2} \frac{\partial P_{(1)}}{\partial x},$$

где  $P_{(2)}$ ,  $V_{(2)}$  - звуковое давление и колебательная скорость во втором приближении,  $b$  - диссипативный коэффициент. На их основе теоретически и экспериментально рассмотрено поведение акустического давления в отраженной волне вблизи границы раздела во втором приближении.

Экспериментально показано изменение осевых распределений амплитуды ВРЧ <sup>н/и</sup> для различных значений чисел Рейнольдса для поля волн накачек. Получены выражения спектральных коэффициентов разложения Фурье с учетом вкладов нелинейностей второго и третьего порядков. Проведен

анализ динамики искажения профиля плоских акустических волн при кубической нелинейности. Рассмотрено колебательное ускорение как динамическая характеристика нелинейного взаимодействия. Предложен способ измерения нелинейного акустического параметра.

Результаты исследований третьей главы позволяют в рамках предложенных моделей осуществлять описание и анализ процессов нелинейных взаимодействий с учетом более высоких приближений, чем второе, что является необходимым для практического описания режимов и условий работы АПА с увеличением мощности излучаемых сигналов.

**В четвертой главе** рассмотрены нелинейные взаимодействия упругих волн в твердых слоисто-дискретных и структурно-изменяющихся средах. В различных устройствах функциональной твердотельной электроники и оптоэлектроники используются кристаллы и их соответствующие срезы, плоскопараллельные грани которых образуют акустические резонаторы. Электроакустическое преобразование сигналов обуславливает возникновение упругого поля внутри резонатора и определяет его выходную реакцию. При повышенных уровнях сигналов внутреннее поле акустического резонатора становится нелинейным относительно уровня входного сигнала и актуальной становится проблема его описания и определения нелинейных вкладов.

С нелинейной связью напряжения  $\sigma_{ij}$  и деформации  $U_{kl}$  как  $\sigma_{ij} = C_{ijkl} U_{kl} + 2b_{ijklmn} U_{kl} U_{mn} + 3d_{ijklmnpq} U_{kl} U_{mn} U_{pq} + \dots$  зависимость скорости распространения акустической волны -  $V_s$  от величины акустического поля становится нелинейной  $V_s = V_0 + \alpha |A|^2 + \beta |A|^3 + \dots$ , где  $V_0$  - линейная составляющая скорости,  $A$  - амплитуда акустического поля в упругой среде,  $\alpha$ ,  $\beta$  - коэффициенты, обусловленные проявлением квадратичной и кубической нелинейностей в среде распространения сигнала.

В результате величина набега фазы сигнала при прохождении слоя становится  $\delta_i = \delta_0 + \Delta\delta_i = \delta_0 + p |E_i|^2 + q |E_i|^3 + \dots$ , где  $\delta_0 = 2\pi f l / V_0$  - набег фазы сигнала при прохождении слоя,  $f$  - частота колебаний,  $l$  - толщина слоя среды резонатора.

натора,  $\Delta\delta_i = p|E_i|^2 + q|E_i|^3 + \dots$  - нелинейная добавка, определяющая изменения фазы, обусловленные нелинейными явлениями в образце при отражении сигналов повышенной интенсивности,  $E_i$  - величина поля упругой деформации в акустическом резонаторе. В этом случае наличие деформации  $E_i$  обуславливает нелинейность закона Гука и определяет зависимость величины фазового сдвига от уровня акустического поля в слое резонатора. Для наиболее используемых в подобных устройствах импульсном режиме проведены исследование нелинейного формирования поля внутри акустического резонатора.

Предложенная модель позволяет теоретически решить задачу описания отклика последовательности отраженных акустических импульсов с учетом нелинейности среды резонатора

$$I_n = I_1 \left[ 1 + (r_1 r_2)^2 + (r_1 r_2)^4 + (r_1 r_2)^6 + 2r_1 r_2 \cos(\delta_{n-1} + \delta_n) + 2(r_1 r_2)^2 \cos\left(\sum_{n-1}^{n+2} \delta_m\right) + 2(r_1 r_2)^3 \cos(\delta_{n+1} + \delta_{n+2}) + 2(r_1 r_2)^3 \cos\left(\sum_{n-1}^{n+4} \delta_m\right) + 2(r_1 r_2)^4 \cos\left(\sum_{n-1}^{n+4} \delta_m\right) + \dots \right],$$

где  $\cos\left(\sum_{i=1}^m \delta_i\right) = \left[ 1 - \frac{1}{2} \left( \sum_{i=1}^m p|E_i|^2 \right)^2 \right] \cos m\delta_0 - \left( \sum_{i=1}^m p|E_i|^2 \right) \sin(m\delta_0)$ ,  $I_n$  - интенсивность акустического поля,  $n$  - число отражений,  $r_{1,2}$  - коэффициенты отражения на границах резонатора. Экспериментальные исследования выполнены для пьезополупроводникового кристалла InSb и показали удовлетворительное соответствие с теоретической моделью.

Структурно-изменяющимися твердыми средами являются кристаллы типа сегнетоэлектриков, сегнетоэластиков и т.д., характеризующихся наличием двух или более стабильных структурных состояний (фазовых переходов), изменение которых сопровождается появлением доменной структуры, представляющей собой слоисто-дискретную систему внутри кристалла.

Предложена модель описания влияния доменной структуры на нелинейные акустические эффекты в сегнетоэлектриках.

В этом случае нелинейный акустический параметр будет

$$\Gamma^* = -\frac{4\rho\omega^2}{q_1^2 C_{44}} \left[ C_{44}^* (\Delta u_{3,2}^m)^2 \Omega_2 n + i q_1 \Omega_1^2 (C_{44}^*)^2 (\Delta u_{3,2}^m)^3 n \right] + \frac{C_{44}^*}{C_{44}},$$

где величина скачка добавки  $u_{3,2}$  на границе доменов -  $\Delta u_{3,2}^m = (\partial u_3^{1m} / \partial y - \partial u_3^{2m} / \partial y)$ ,  $C_{44}$  и  $C_{44}^*$  - упругие модули второго и третьего порядков соответственно,  $q_1$  - волновое число акустической волны основной частоты  $\omega = 2\pi f_1$ ,  $n$  - число доменных стенок на единицу длины в направлении координаты  $y$ . Величина  $C_{44}^*/C_{44}$  определяет решеточный вклад в величину  $\Gamma$ , присутствие остальных членов обусловлено нелинейностью, вызванной динамическим изменением доменной структуры. Величина доменного вклада при нелинейном взаимодействии упругих волн в сегнетоэлектрике  $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  (RS) зависит от  $n$  и монодоменизирующие поля  $E_x$  влияют на эффективность такого вида взаимодействий, что показано экспериментально и приведена оценка его величины.

На основе нелинейного взаимодействия акустических волн в твердых телах предложено построение устройства обработки сигналов фазированных антенных решеток гидроакустических систем в канале переизлучения.

Результаты четвертой главы позволяют использовать разработанные модели описания нелинейных приближений акустических полей для оценки возможных нелинейных вкладов за счет переотражений, доменной структуры и т.п. на выходные сигналы акустоэлектронных устройств и приборов.

**В пятой главе** представлены разработанные модели описания процессов рассеяния акустических волн при нелинейном взаимодействии, имеющих место при использовании акустических параметрических антенн для локации объектов различной формы.

Для объекта лоцирования (рассеиватели - сфера, цилиндр) расположенного в области нелинейного взаимодействия генерация ВКЧ происходит как до рассеяния, так и после его. Результирующее первичное поле акустического давления для двухчастотного излучения полей с частотами накачки  $\omega_1$  и  $\omega_2$  будет:

$$P^{(1)} = P_1^{(1)} + P_2^{(1)} = \left\{ i\omega_1 \rho_0 \psi_{10} \left[ \sum_{l=0}^{\infty} B_{1l}^{(1)} \exp\left(i\left(\omega_1 t - \frac{\pi l}{2}\right)\right) + \sum_{m=0}^{\infty} B_{2m}^{(1)} \exp\left(i\left(\omega_1 t - \varphi_m^{(1)}\right)\right) \right] + K.C. \right\} + \left\{ i\omega_2 \rho_0 \psi_{20} \left[ \sum_{l=0}^{\infty} B_{1l}^{(2)} \exp\left(i\left(\omega_2 t - \frac{\pi l}{2}\right)\right) + \sum_{m=0}^{\infty} B_{2m}^{(2)} \exp\left(i\left(\omega_2 t - \varphi_m^{(2)}\right)\right) \right] + K.C. \right\}$$

$$\text{где } B_{1l}^{(n)} = (2l+1)j_l(k_n r)P_l(\cos \Theta), \quad B_{2m}^{(n)} = A_m^{(n)}(-i)D_m^{(n)}P_m(\cos \Theta),$$

$$D_m^{(n)} = \sqrt{j_m^2(k_n r) + n_m^2(k_n r)} - \text{модуль, } \varphi_m^{(n)} = -\arctg[j_m(k_n r)/n_m(k_n r)] - \text{фаза сферической функции Ханкеля второго рода } m\text{-го порядка } h_m^{(2)}(k_n r), j_l(k r) - \text{сферическая функция Бесселя } l\text{-го порядка, } n_m(k_n r) - \text{сферическая функция Неймана } m\text{-го порядка, } P_m(\cos \Theta) - \text{полином Лежандра, } \psi_{10} - \text{амплитуда потенциала скорости, } a - \text{радиус сферы, } k_n - \text{волновое число, } A_m^{(n)} - \text{коэффициенты, определяемые из граничных условий на поверхности сферы.}$$

Задача в такой постановке является нелинейной и ее решение позволяет определить спектральные составляющие  $2\omega_1$ ,  $2\omega_2$ ,  $(\omega_1 + \omega_2 = \omega_+)$ ,  $(\omega_2 - \omega_1 = \Omega)$  поля рассеяния на лоцируемом объекте волн накачки. Для звуковых давлений поля ВРЧ получено  $P_{\Omega}^{(2)}(r) = C[P_{\Omega 1}^{(2)} + P_{\Omega 2}^{(2)} + P_{\Omega 3}^{(2)} - P_{\Omega 4}^{(2)}]$ , где  $C = C_1 / \sin 2\Theta$ ,  $C_1 = 12\varepsilon\omega_1\omega_2\rho_0\psi_{10}\psi_{20}\Omega^2 e^{-iKr} / K^2 C_0^4 r$ . Слагаемые  $P_{\Omega 1}^{(2)}$ ,  $P_{\Omega 2}^{(2)}$ ,  $P_{\Omega 3}^{(2)}$ ,  $P_{\Omega 4}^{(2)}$  имеют сложный вид и соответствуют по физическому смыслу составляющим поля нелинейного взаимодействия между: падающими плоскими волнами накачки частот  $\omega_1$  и  $\omega_2$ ; падающей плоской волной  $\omega_1$  и рассеянной сферической  $\omega_2$ ; падающей плоской волной  $\omega_2$  и рассеянной сферической  $\omega_1$ ; рассеянными сферическими волнами с частотами  $\omega_1$  и  $\omega_2$  в среде вокруг рассеивателя.

Теоретически и экспериментально рассмотрены особенности формирования поля ВКЧ в режимах работы АПА в сравнении с рассеянием волн накачки. Используя метод последовательных приближений для граничных условий, предложена модель описания поля источника в цилиндрическом волноводе с шероховатыми границами. Для случаев рассеяния акустических

волн на газовых воздушных пузырьках уточнено уравнение движения одиночной газовой полости с точностью до членов третьего и четвертого порядков малости.

Проведены экспериментальные модельные исследования рассеяния плоских акустических волн на сфере при нелинейном взаимодействии, а также экспериментальные исследования фасетной модели рассеяния на шероховатой поверхности и установлены основные закономерности для процессов рассеяния.

В результате теоретически обоснован и предложен параметрический эхолокатор для дистанционного определения концентрации свободного газа в жидкости.

Результаты пятой главы позволили дать теоретические обоснования результатов натурных измерений с использованием АПА при лоцировании малоразмерных объектов и неоднородностей в морской среде, учесть выводы и рекомендации при разработке и проектировании АПА, описать процессы рассеяния при нелинейном взаимодействии и использовать выводы для оценки условий работы АПА в их практическом применении для локации и реализации дистанционных методов определения концентрации свободного газа в жидкостях.

**В заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

**ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ.**

1. Решена задача определения направленности АПА с системой слоев в ОНВ с учетом и без учета затухания первичных полей накачки, разработаны модели анализа направленности АПА по акустическим линейным и нелинейным параметрам сред слоистой системы.

2. Разработан метод решения задачи формирования направленности АПА в слоистой структуре ОНВ взаимодействия с размытыми границами.

23

3. Решена задача определения направленности АПА с тонкой структурой ОНВ дискретного изменения скорости звука как системы горизонтальных слоев и предложена модель определения характеристики направленности АПА при вертикальном изменении скорости звука (ВРСЗ) в среде нелинейного взаимодействия.

4. Предложена методика описания многоэлементных акустических параметрических антенн как совокупности линейных систем излучателей первичных полей накачек.

5. Решена задача формирования поля излучающих АПА с границами раздела различного вида в ОНВ со сравнением теоретических результатов с экспериментальными исследованиями.

6. Уточнены основные соотношения между параметрами акустической волны во втором приближении с учетом нелинейных и диссипативных членов из системы основных уравнений акустики с учетом квадратичной (четной) и кубической (нечетной) нелинейностей в жидких средах при нелинейном взаимодействии для рассмотрения задачи описания процессов распространения и отражения по акустическим полям ВКЧ.

7. Предложено рассмотрение ускорения как динамической характеристики нелинейного взаимодействия в рамках методики исследования динамики искажений профиля плоских акустических волн конечной амплитуды с учетом квадратичной и кубической нелинейностей.

8. Решена задача определения спектральных коэффициентов разложения Фурье с учетом нелинейностей второго и третьего приближений.

9. Разработана модель рассмотрения нелинейных явлений в твердом акустическом резонаторе в условиях импульсного возбуждения с учетом влияния нелинейных свойств его среды на изменения фазовых соотношений при внутреннем переотражении от границ.

10. Решена задача теоретического описания механизма влияния колебаний доменных стенок на нелинейные свойства сегнетоэлектрических кристаллов и проведены экспериментальные исследования.

11. Разработаны модели и решены задачи по описанию процессов формирования рассеянных полей на объектах сферической и цилиндрической формы в ОНВ АПА при нелинейном взаимодействии падающих первичных полей накачки и результаты экспериментальных исследований рассеянных вторичных полей волн комбинационных частот поля АПА.

12. Уточнено уравнение движения газовой полости в жидкости с учетом квадратичной и кубической нелинейностей для описания процессов распространения и нелинейных взаимодействий акустических волн в жидких газонаполненных средах.

13. Выполнены экспериментальные исследования поля АПА при наличии в ОНВ АПА жидких и твердотельных слоев, их комбинаций, рассеивателей в виде сферы и неровных поверхностей, а также поля акустического нелинейного твердотельного резонатора пьезополупроводникового кристалла InSb в импульсном режиме.

14. Предложены принципы построения технических твердотельных устройств обработки сигналов гидроакустических систем и параметрических эхолотаторов дистанционного определения концентрации свободного газа в жидкостях с использованием нелинейных взаимодействий акустических волн.

15. Выработаны рекомендации по определению изменения вида ХН АПА при изменении форм различного рода перегородок в ОНВ первичных полей и установления степени влияния обтекателей на пространственные характеристики АПА в процессе их проектирования.

#### СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Заграй Н.П. "Диаграмма направленности параметрического излучателя при распространении взаимодействующих волн через слои", III Всесоюзное научно-техническое совещание "Нелинейная гидроакустика", Сб. "Прикладная акустика", вып. IX, 1983, Таганрог, ТРТИ, с. 96-99.

2. Заграй Н.П., Голосов С.П. "Влияние преграды в области нелинейного взаимодействия акустических волн на характеристики параметрического излучателя", Сб. НТО им. А.Н. Крылова "Акустические методы исследования океана", Л., Судостроение, вып. 334, 1980, с. 50-55.

3. A.Alippi, G.Scarano, N.Zagrai Directivity Pattern of Parametrically Generated Acoustic Waves // ITALI, Il Nuovo Cimento, vol. 9D, N 5, 1987, p. 489-496.

4. Заграй Н.П., Голосов С.П. Влияние преграды в виде пластины в области нелинейного взаимодействия акустических волн на распределение поля параметрического излучателя // Сб. НТО им. А. Н. Крылова "Акустические методы исследования океана", Л., Судостроение, вып. 353, 1981, с. 55-61.

5. Zagrai N., Georgi M. Layered Structure Influence on Nonlinear Parametric Array Characteristics // Proceedings of the Fifth International Conference "Remote Sensing for Marine and Coastal Environments", vol.II (II-18), San Diego, California, USA, 1998.

6. Заграй Н.П., Павлова М.Н. Применение метода погружения для решения задач распространения волн в неоднородной слоистой среде // НТК "Радио и волоконно-оптическая связь, локация и навигация", Россия, Воронеж, Тезисы докладов, т. 1, 1997 г., с. 37-40.

7. Заграй Н.П. Пространственный анализ и синтез сигналов параметрической антенны в среде с вертикальным распределением скорости звука // Известия высших учебных заведений, Электромеханика, НГТУ, № 4, 1995 г., с. 18-21.

8. Заграй Н.П., Старченко И.Б., Харин А.Н. Влияние области взаимодействия на характеристику направленности параметрической антенны // В кн. "Прикладная акустика". Таганрог, ТРТИ, 1985, вып. XI, с. 27-32.

9. Заграй Н.П., Голосов С.П. Поле параметрического излучателя при изменении формы области взаимодействия // В кн. "Прикладная акустика". - Таганрог, ТРТИ, 1985, вып. XI, с. 32-36.

10. Заграй Н.П., Голосов С.П. Влияние формы области нелинейного взаимодействия на поле параметрической антенны // Научно-технический сборник: Судостроительная промышленность, серия: Акустика, ЦНИИ "Румб", вып.6, 1990 г., с. 83-84.

11. Заграй Н.П., Голосов С.П. Наклонное падение луча параметрической антенны на плоский слой // Комплексные геолого-геофизические исследования Мирового океана (тезисы докладов), ч.1, Геленджик, 1988, с.59-60.

12. Заграй Н.П., Голосов С.П. Экспериментальные исследования поля параметрического излучателя при наличии преграды в области взаимодействия // Сб. "Прикладная акустика", вып. IX., Таганрог, 1983, ТРТИ, с.99-102.

13. Заграй Н.П., Голосов С.П., Карабутова Н.Е. Поле параметрического излучателя за тонкой стальной пластиной // Сб. "Прикладная акустика", вып. X, 1983, Таганрог, ТРТИ, с. 70-72.

14. Заграй Н.П., Голосов С.П. Поле параметрического излучателя при изменении зазора между излучателем и стальной пластиной // Сб. "Прикладная акустика", вып. X, 1983, Таганрог, ТРТИ, с. 72-75.

15. Заграй Н.П., Голосов С.П. Работа акустического параметрического излучателя через систему пластин в области нелинейного // Сб. НТО им. А. Н. Крылова "Акустические методы исследования океана", вып.353, 1981, Судостроение, Л., с. 62-67.

16. Заграй Н.П., Голосов С.П. Влияние преграды в области нелинейного взаимодействия акустических волн на характеристики параметрического излучателя // Сб. НТО им. А.Н.Крылова "Акустические методы исследования океана", вып.334, 1980, Судостроение, Л., с. 50-55.

17. Другов А.И., Заграй Н.П., Савицкий О.А. "Нелинейное взаимодействие волн при прохождении границы раздела двух сред", // Сб. "Прикладная акустика", вып. II, 1976, Таганрог, ТРТИ, с. 36-42.

18. Заграй Н.П., Голосов С.П., Зайцев С.Ф. Граница раздела двух сред в области нелинейного взаимодействия // Сб. "Прикладная акустика", вып. XII, 1987, Таганрог, ТРТИ, с. 72-76.

19. Заграй Н.П. Поле параметрической антенны в слоисто-неоднородной среде // X Всесоюзная конференция "Информационная акустика", 1990 г., Москва, Тезисы докладов, с. 6.

20. Заграй Н.П., Голосов С.П., Калошин П.В. Наклонное падение луча параметрической антенны на плоский слой // Сб. "Прикладная акустика", вып. XIV, 1990, Таганрог, ТРТИ, с. 26-30.

21. Заграй Н.П. Пространственный анализ и синтез сигналов параметрической антенны в среде с вертикальным распределением скорости звука // Известия высших учебных заведений, Электромеханика, № 4, 1995г., НГТУ, с. 18-21.

22. Заграй Н.П., Гаврилов А.М. Нелинейные эффекты третьего порядка в звуковом поле параметрической антенны // VII научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов, Москва, 1988, с. 78-80.

23. Заграй Н.П., Гаврилов А.М. Нелинейные эффекты высших порядков в поле акустических волн // Известия Северо-Кавказского научного центра высшей школы, технические науки, 1992, №2, с. 26-32.

24. Заграй Н.П. Нелинейное отражение акустических волн на плоских границах упругих сред // Известия высших учебных заведений, Электромеханика, №1-2, 1995г., НГТУ, с. 134-135.

25. Заграй Н.П., Ковалев О.М. Отражение и прохождение акустических волн повышенной интенсивности на границах раздела биологических сред // Медицинские информационные системы МТНС, Таганрог: ТРТУ, 1995, Вып.5 (XII), с. 21-23.

26. Заграй Н.П., Гаврилов А.М. Нелинейные эффекты третьего порядка в звуковом поле параметрической антенны // Научно-технический сборник: Судостроительная промышленность, серия: Акустика, ЦНИИ "Румб", вып.6, 1990г., с. 81-82.

27. Заграй Н.П., Ковалев О.М. Экспериментальное измерение коэффициентов отражения в квадратичном приближении // III Всероссийская научно-техническая конференция "Методы и средства измерений физических величин", Россия, Нижний Новгород, Тезисы докладов, ч.II, 1998г., с.9.

28. Заграй Н.П., Ковалев О.М. Интегральное решение для анализа спектра простых акустических волн повышенной интенсивности // III Всероссийская научно-техническая конференции с между народным участием "Теория цепей и сигналов (ТЦиС-96)", Тезисы докладов г.Таганрог,1996 г., с. 69-70.

29. A.Alippi, M.Bertolotti, A.Ferrary, D.Sette, G.Sibilia, N.Zagrai "Behaviour of a nonlinear acoustic resonator under conditions of pulsed excitation", 12 International Congress on Acoustics, Toronto, Canada, 1986, p 45.

30. Заграй Н.П. Исследование нелинейного акустического резонатора на полупроводнике InSb при импульсном возбуждении // Известия высших учебных заведений, "Электроника", № 1, 1998, с. 3-12.

31. Заграй Н.П., Зарембо Л.К. Влияние доменной структуры на нелинейные акустические эффекты в сегнетоэлектриках // IX Всесоюзное Сопровождение по сегнетоэлектричеству, секция 8-B10 Ростов-на-Дону, 1979, с.246.

32. Душаткин В.Н., Заграй Н.П., Тимошенко В.И., Харин Н.А. Ультразвуковое устройство обработки сигналов // Авт. свид. СССР, № 1499422, заявка № 4194758, приоритет от 16.02.1987 г. Зарегистрировано 8.04.1989 г.

33. Заграй Н.П., Тимошенко В.И. "Нелинейное рассеяние звука на сфере" // Тезисы 2-го Всесоюзного Акустического семинара "Модели, алгоритмы, принятие решений", ЛИАП, АКИН, М., 1988, с. 13.

34. Заграй Н.П., Душенина И.Б., Старченко Б.К. Рассеяние плоской волны на сфере и цилиндре при нелинейном взаимодействии // Сб. "Прикладная акустика", Таганрог, ТРТИ. вып.13, 1988 г., с. 90-95,

35. Заграй Н.П., Аббасов И.Б. Рассеяние плоской волны на сфере и цилиндре при нелинейном взаимодействии // X Всесоюзная конференция "Информационная акустика". Тезисы докладов, г. Москва, 1990 г., с. 11.

36. Заграй Н.П., Аббасов И.Б. Рассеяние на сфере взаимодействующих плоских акустических волн на сфере // Акуст. журн., 1994, т.40, № 4, с. 535-541.
37. Аббасов И.Б., Гарбуз А.М., Заграй Н.П. Исследование рассеяния нелинейно-взаимодействующих волн на сфере // Известия высших учебных заведений, Северо-Кавказский регион, Естественные науки (Механика), Ростов-на-Дону, № 3, 1994 г., с. 8-13.
38. Заграй Н.П., Аббасов И.Б. Рассеяние на сфере нелинейно-взаимодействующих акустических волн // Известия АН. Механика жидкости и газа, № 2, 1995, с. 4-12.
39. Zagraj N.P., Abbasov I.B. Sphere scattering of nonlinearly interacting acoustic waves // Fluid Dynamics, vol.30, No.2, 1995, p.158-165.
40. Заграй Н.П., Аббасов И.Б. Экспериментальные исследования рассеяния нелинейно-взаимодействующих плоских акустических волн на сфере // Акуст. журн., 1996, т. 42, № 3, с. 309-314.
41. Заграй Н.П., Аббасов И.Б. Рассеяние на сфере бигармонической плоской волны // Конференция ПМГИ-92 "Проблемы метрологии гидрофизических измерений" М., НПО "ВНИИФТРИ". Тезисы докладов, 1992 г., с.92.
42. Заграй Н.П., Аббасов И.Б. Исследование акустических полей вторых гармоник при рассеянии на сфере нелинейно-взаимодействующих плоских волн // Акуст. журн., 1996, т. 40, № 4, с. 535-541.
43. Zagrai N.P., Abbasov I.B. Experimental investigation of the scattering of the field of a parametric antenna by a hard sphere // Tech. Phys., (USA, American Institute of Physics), 41(11), November 1996, p. 1172 - 1176.
44. Заграй Н.П., Аббасов И.Б. Экспериментальные исследования рассеяния на жесткой сфере поля акустической параметрической антенны // Журнал технической физики, т. 66, вып. 11, 1996, с. 162-170.
45. Алексеев В.К., Заграй Н.П., Голосов С.П. Поле источника в акустически жестком цилиндрическом волноводе с шероховатой границей // Сб.

- "Акустические средства и методы освоения океана", 1981 г. Владивосток, с.33-35.
46. Заграй Н.П., Кавчук А.С., Черепанцев С.Ф. Экспериментальное изучение фацентной модели рассеяния // Сб. "Прикладная акустика", вып. 14, 1990, Таганрог, ТРТИ, с. 64-69.
47. Аббасов И.Б., Георги М.Ю., Заграй Н.П., Исследование неоднородностей водной среды с помощью параметрических антенн // II Всероссийская научно-техническая конференция "Техническая кибернетика, радиоэлектроника и системы управления". Тезисы докладов, Таганрог, ТРТУ. 1994 г., с. 192-193.
48. Аббасов И.Б., Заграй Н.П. Применение нелинейно-взаимодействующих акустических волн для диагностики водной среды // XVI Всероссийская конференции с международным участием "Акустоэлектроника и физическая акустика твердого тела". ВКАЭФА-94, Тезисы докладов, Сыктывкар, 1994 г., с. 136-138.
49. Abbasov I.B., Pavlovsky A.W., Zagrai N.P. Physical processes of scattering nonlinearly interacting waves by spherical dispersers // II International scientific-technical conference "Current problems of fundamental sciences". Moscow. 1994. V.3., p. 38.
50. Аббасов И.Б., Заграй Н.П. Исследование звукового поля волны суммарной частоты при рассеянии на сфере нелинейно-взаимодействующих плоских акустических волн // Труды Третьей Международной научно-технической конференции "Актуальные проблемы электронного приборостроения" АПЭП-96, Тезисы докладов, т. 7, Новосибирск, 1996г., с. 101-102.
51. Заграй Н.П. Нелинейный анализ и синтез слоистых структур в поле акустической параметрической антенны // III Всероссийская научно-техническая конференции с между народным участием "Теория цепей и сигналов (ТЦИС-96)", Тезисы докладов г.Таганрог, 1996 г., с. 67-68.
52. Заграй Н.П., Аббасов И.Б. Особенности экспериментальных исследований рассеяния поля параметрической антенны на жестких сферах // III



Всероссийская научно-техническая конференция с между народным участием "Теория цепей и сигналов (ТЦиС-96)", Тезисы докладов г.Таганрог, 1996 г., с. 68-69.

53. Заграй Н.П., Аббасов И.Б. Методика экспериментальных исследований рассеяния на сфере нелинейно-взаимодействующих плоских волн // Известия ТРТУ, №1, 1997 г., с. 121.

54. Заграй Н.П., Аббасов И.Б. Экспериментальные измерения рассеяния нелинейно-взаимодействующих акустических волн на телах сферической формы // II Всероссийская научно-техническая конференция "Методы и средства измерений физических величин", Россия, Нижний Новгород, ч. II, 18-19 апреля, 1997 г., с. 9.

55. Zagrai N.P., Abbasov I.B. The Secondary Field of Sum-Frequency Wave in the Scattering of Plane Waves from a Sphere // Acoustical Physics, Vol.44, No.1, 1998, p. 97-99.

56. Заграй Н.П. Математическое моделирование процессов нелинейного рассеяния на биологических объектах сферической и цилиндрической формы // The 3 International Conference "Physics and Radioelectronics in Medicine and Biotechnology", Russia, ФРЭМБ-98, г. Владимир, 1998 г., с.23.

57. Заграй Н.П., Аббасов И.Б. Исследование вторичного поля волны суммарной частоты при рассеянии нелинейно-взаимодействующих плоских волн на сфере // Акуст. журн., 1998 г, т. 44, № 1, с. 116-118.

58. Заграй Н.П., Кабарухин Ю.И. Использование параметрического излучателя для дистанционного контроля процесса развития кавитации // Тез.докл., Всесоюзн.симп."Акустическая кавитация и проблемы интенсификации технологических процессов", Одесса, 1989, с. 94.

59. Кабарухин Ю.И. Заграй Н.П. Параметрический эхолокатор // Авторское свидетельство № 1642861. Заявка № 4678588, приоритет от 14.04. 1989 г., зарегистрировано 15.12.1990 г.

60. Заграй Н.П., Румянцев К.Е., Федосов В.П., Лобач В.Т., Обуховец В.А. Применение средств локации для контроля параметров водной экосреды // Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1991 г., -163 с.

61. Заграй Н.П. Нелинейные взаимодействия в слоистых и неоднородных средах // Под редакцией академика АЕН РФ В.И.Тимошенко. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1998, -433 с.

В работах, написанных в соавторстве, личный вклад автора состоит в следующем: в [2-4] автором проведен теоретический анализ влияния присутствия слоя и системы слоев в области нелинейного взаимодействия на характеристики АПА; в [5,6] разработан алгоритм проведения исследований по определению влияния каждого из слоев слоистой системы в области нелинейного взаимодействия на характеристики параметрической антенны; в [6] разработан метод погружения для описания изменений плотности среды, скорости и нелинейного параметра квадратичной нелинейности на характеристики АПА; в [8 -12] разработана физическая модель учета влияния изменения формы области нелинейного взаимодействия на характеристики направленности АПА, проведено экспериментальное исследование и сравнение результатов с теоретическим рассмотрением; в [13] разработана математическая модель рассмотрения поля акустической параметрической антенны при работе в таких технических конструкциях как обтекатели гидроакустических антенн, написан ряд программ по расчету характеристик АПА; в [14 -16, 20] разработаны экспериментальные установки и методики проведения исследований по влиянию жидких слоев, пластин и системы пластин на характеристики АПА; в [17,18] разработана физическая модель рассмотрения нелинейного взаимодействия акустических волн при прохождении полупрозрачной границы раздела сред, проведены экспериментальные исследования влияния границ раздела на характеристики АПА, сделаны выводы; в [22,23,26] разработана модель учета нелинейных эффектов третьего порядка в звуковом поле АПА и проведен анализ динамики искажения профиля волны как по скорости, так и по ускорению в акустической волне; в [25,27] разработана модель описания отражения и прохождения на границе раздела сред акустических волн повышенной интенсивности с учетом полученных во втором приближении соотношений ее основных параметров, раз-

работана экспериментальная установка и методика проведения измерений давлений для отраженных волн; в [28] получено интегральное решение для анализа спектра простых акустических волн повышенной интенсивности; в [29] разработана модель описания поля нелинейного акустического резонатора при импульсном возбуждении, проведены исследования и сделаны выводы; в [31] разработана модель учета влияния доменной структуры на нелинейные эффекты в сегнетоэлектриках и методика проведения измерений; в [32] разработана схема ультразвукового устройства обработки сигналов фазированных гидроакустических антенных решеток; в [33-37] разработана физическая и математическая модель описания нелинейного взаимодействия акустических волн при рассеянии на объектах сферической формы; в [38,39] разработана модель рассеяния нелинейно взаимодействующих плоских волн с рассмотрением генерируемого спектра волн комбинационных частот; в [40,41,43,44] разработана экспериментальная установка и методика проведения исследований, получены результаты для поля волны разностной частоты АПА, сделаны выводы; в [42] разработана модель описания поля вторых гармоник при рассеянии на сфере нелинейно взаимодействующих плоских волн; в [45] разработана модель использования метода последовательных приближений для описания поля источника в цилиндрическом волноводе с шероховатой поверхностью; в [46] разработана методика проведения экспериментальных исследований фацетной модели рассеяния на неровной рассеивающей поверхности границы раздела сред; в [47,48] предложены методики использования АПА для исследований сферических неоднородностей и диагностики водной среды; в [49,50,55,57] разработана модель описания поля волны суммарной частоты при рассеянии на сфере нелинейно взаимодействующих плоских волн, проведены расчеты по теоретической модели, сделаны выводы; в [52-54] разработана экспериментальные установки и методики проведения экспериментальных исследований для волн комбинационных частот при рассеянии на сфере в поле АПА; в [58] разработана модель АПА для дистанционного контроля процесса развития кавитации по рассеянию волны разностной частоты на газовых пузырьках; в

[59] разработана схема параметрического эхолота для дистанционного определения концентрации свободного газа в жидкости; в [60] обобщены результаты исследований по применению АПА для дистанционного контроля параметров водной среды акустическими методами и сделаны рекомендации по использованию АПА для экологического мониторинга.