

На правах рукописи

Зыонг Минь Хай

Системный анализ, моделирование и оптимизация технических систем подводного экранирования

Специальность 05.13.01 - Системный анализ, управление и обработка информации (технические системы)

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

МОСКВА – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Научно-исследовательский и экспериментальный институт автомобильной электроники и электрооборудования» Министерства промышленности и торговли РФ.

НАУЧНЫЙ КОНСУЛЬТАНТ:

доктор технических наук, профессор
Сторожев Валерий Иванович

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Мисюрин Сергей Юрьевич - доктор физико-математических наук, профессор, Директор Института интеллектуальных кибернетических систем, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,

Митрофанов Владимир Георгиевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматизированные системы обработки информации и управления» ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,

Преображенский Андрей Петрович, доктор технических наук, профессор Автономной некоммерческой образовательной организации высшего образования (ВИВТ-АНОО ВО) «Воронежский институт высоких технологий».

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ: ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ)»

Защита состоится « » 2018 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 217.047.01 во ФГУП «Научно-исследовательский и экспериментальный Институт автомобильной электроники и электрооборудования» Министерства промышленности и торговли РФ по адресу: 105187, Москва, ул. Кирпичная д.41.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГУП «Научно-исследовательский и экспериментальный Институт автомобильной электроники и электрооборудования» Министерства промышленности и торговли РФ. www.niiae.ru

Автореферат разослан « » 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного Совета Д 217.047.01
доктор технических наук, старший научный сотрудник

Варламов О.О



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Проблема системного анализа, моделирования и оптимизации технических систем подводного гидроакустического экранирования является важнейшей составляющей глобальной научно-технической задачи управления характеристиками полей гидроакустических волн, как обусловленных непосредственно акустической активностью подводных транспортных средств (ПТС) и подводных сооружений (ПС), работой их механизмов, технологическими процессами эксплуатации, функционированием приборов гидроакустического зондирования, идентификации, позиционирования и связи, так разнообразными природными факторами. Так, для ПТС специального назначения совершенствование методов и средств подводного экранирования является условием снижения возможностей их пассивного обнаружения и идентификации по генерируемым акустическим сигналам различной природы, уровня и спектра; снижения вероятности выхода их акустического излучения на уровни гидроакустической чувствительности для систем противолодочного вооружения; снижения уровней интенсивности и контрастности отраженных от ПТС сигналов при активном гидроакустическом зондировании.

Для ПТС, используемых в автоматизированных технологиях глубоководного монтажа, высокие уровни собственных гидроакустических излучений и дифракционные поля гидроакустических волн усложняют функционирование и снижают точность работы гидроакустических устройств связи, локации и позиционирования. В этом случае ключевыми заданиями разработки усовершенствованных технических систем гидроакустического экранирования являются обеспечение эффективного направленного излучения «незашумленных» гидроакустических сигналов, энергетически эффективного контрастного приема, фильтрации и обработки сигналов данной физической природы.

Технические системы экранирования ПТС и ПС играют определяющую роль и в решении задач снижения степени гидроакустической «зашумленности» как фактора негативного влияния на экологическую обстановку и состояние окружающей среды, на технологии гидролокации и подводной связи в процессах морского промысла. Сходные проблемы, связанные с механизмами управления уровнями акустической активности на базе использования технических систем подводного экранирования, свойственны и технологиям гидрофизических изысканий, подводной картографии, сейсмоакустики пород морского дна.

При неоспоримых современных достижениях научных исследований и наличии широкого круга реализованных технологических разработок в данных областях, возможности дальнейшего совершенствования научной базы для синтеза новых оптимизированных технологий гидроакустического экранирования далеко не исчерпаны. Это касается, в частности, актуальных теоретических проблем анализа эффективности использования в конструкциях технических систем гидроакустического экранирования и гидроакустических покрытий новых поколений конструкционных материалов с усложненными физико-механическими свойствами, в том числе нанокompозитных функционально-градиентных анизотропных материалов, получаемых методами 3D-печати; дальнейшего применения более совершенных методик структурно-параметрической оптимизации в моделях технических систем гидроакустического экранирования; а также методов более совершенного учета факторов неопределенности и нечеткости в рассматриваемых моделях. В этой связи, рассматриваемая научно-техническая проблема выходит на новый уровень по содержанию и комплексности постановочных заданий. Дальнейший рост эффективности техники подводного экранирования может быть достигнут за счет использования в них самых современных высокоэффективных научных решений в области методов системного анализа, структурно-параметрической оптимизации, управления и обработки информации.

В свете вышеизложенного, осуществляемая в данной диссертационной работе разработка комплекса новых эффективных компьютерно-математических методик теоретических исследований в рассматриваемой области, а также получение с их

применением новых результатов в общих закономерностях и механизмах управления процессами трансформации гидроакустических сигналов в технических системах подводного экранирования, является открытой для дальнейших исследований актуальной научной проблемой важного социально-экономического и хозяйственного значения. Ее решение на основе применения методов системного анализа, структурно-параметрической оптимизации и приемов учета факторов неопределенности в теоретическом математическом моделировании, лежит в основе формирования информационной базы для принятия эффективных решений при конструировании и предпроектных расчетах ответственных технических систем гидроакустического экранирования с широким спектром функционального назначения.

Приведенные соображения являются мотивами отнесения темы данной диссертационной работы к актуальной проблематике современных исследований в области системного анализа, управления и обработки информации, имеющих важное технико-экономическое значение и представляющих собой значительный вклад в решение комплекса заданий инновационного научно-технического развития.

Целью диссертационной работы является разработка теоретических численно-аналитических методов качественного и количественного исследования, системного анализа, а также структурно-параметрической оптимизации детерминистических и нечетких математических моделей функционирования и управления параметрами технических систем гидроакустического экранирования с конструкционными элементами, обладающими комплексом усложненных структурно-геометрических и физико-механических свойств.

Объектом исследования являются процессы функционирования и структурно-параметрическая оптимизация рабочих характеристик технических систем подводного гидроакустического экранирования

Предметом исследования являются детерминистические и нечеткие теоретические модели конструкционных элементов подводных гидроакустических экранов с усложненными структурно-геометрическими и физико-механическими свойствами

На защиту выносятся:

- синтез и реализация концепции создания усовершенствованной нечеткой иерархической модели оценивания стратегий оптимизации характеристик технических систем гидроакустического экранирования с учетом природы источников, способов подавления и переориентации акустических сигналов;

- теоретические численно-аналитические методы исследования и структурно-параметрической оптимизации моделей технических систем гидроакустического экранирования с однослойными, двухслойными и трехслойными плоскими анизотропными элементами из вязкоупругих функционально-градиентных композиционных материалов гексагональной и триклинной системы, включая экраны с жидкостными прослойками и мембранными покрытиями граничных плоскостей;

- модифицированные методики и теоретические алгоритмы исследования и структурно-параметрической оптимизации моделей плоских структурированных многослойных гидроакустических экранов из вязкоупругих нанокompозитных анизотропных материалов триклинной системы, обладающих экспоненциально-степенной неоднородностью физико-механических характеристик;

- усовершенствованные модификации, методики структурно-параметрического анализа и оптимизации моделей функционирования цилиндрических функционально-градиентных анизотропных элементов систем экранирования гидроакустических преобразователей и антенн;

- усовершенствованные модификации прикладных моделей структурно-параметрической оптимизации характеристик многосвязных перфорированных анизотропных пластинчатых элементов технических систем гидроакустического экранирования с разнотипно герметизированными поперечными полостями;

- концепция и методика исследования геометрически точной модели функционирования поперечно-анизотропного функционально-градиентного перфорированного гидроакустического экрана с герметизированными поперечными полостями при учете обусловленных гидростатическим давлением начальных деформаций в рамках линеаризованной теории сжимаемых предварительно-напряженных сред;

- концепция синтеза и анализа моделей функционирования конструктивных элементов технических систем гидроакустического экранирования в условиях структурной и параметрической неопределенности;

- методика нечетко-множественного анализа факторов неопределенности и нечеткого оценивания рабочих характеристик в прикладных моделях поперечно-перфорированных анизотропных композиционных гидроакустических экранов с герметизирующими покрытиями при учете неконтрастности физико-механических и геометрических экзогенных параметров;

- методы и результаты теоретического анализа нечетких математических моделей функционирования плоских анизотропных функционально-градиентных элементов технических систем гидроакустического экранирования с учетом факторов неопределенности параметров их конструктивного исполнения и функционирования;

- численно-аналитическая методика моделирования и оптимизации рабочих характеристик пространственных пластинчатых элементов технических систем гидроакустического экранирования с внутренней перфорацией туннельными цилиндрическими полостями с газовоздушным либо упругим эластичным заполнением;

- разработанные в процессе исследований комплексы программных приложений для реализации предложенных теоретических методик исследования характеристик конструкций гидроакустических экранов с комплексом усложненных физико-механических и геометрических свойств;

- результаты практической разработки и внедрения новых элементов технических систем гидроакустического экранирования с использованием теоретических результатов проведенных исследований, в том числе, данные, характеризующие опыт эффективного практического применения ряда основных результатов работы при конструировании технических систем гидроакустического экранирования для нескольких типов подводных транспортных средств.

Научная новизна работы в контексте представленных целей заключается в следующем:

1. На основе системного анализа проблемы гидроакустической активности подводных транспортных средств и подводных сооружений, а также методов ее снижения, с применением методов нечеткого иерархического моделирования предложены новые эффективные приемы решения проблемы определения комплекса механизмов для оптимизации характеристик технических систем гидроакустического экранирования с учетом природы источников, способов подавления и переориентации акустических сигналов.

2. Предложены численно-аналитические методы исследования и структурно-параметрической оптимизации нового класса моделей технических систем гидроакустического экранирования с однослойными, двухслойными и трехслойными плоскими трансверсально-изотропными элементами из вязкоупругих функционально-градиентных материалов

3. Разработаны новые модификации теоретических алгоритмов исследования и структурно-параметрической оптимизации моделей плоских многослойных гидроакустических экранов из вязкоупругих однородных и функционально-градиентных нанокompозитных анизотропных материалов триклинной системы, включая экраны с жидкостными прослойками и мембранными покрытиями граничных плоскостей.

4. Предложены новые методики анализа моделей функционирования и оптимизации параметров однослойных и двухслойных обладающих экспоненциально-степенной неоднородностью физико-механических характеристик плоских элементов технических

систем гидроакустического экранирования, изготовленных из вязкоупругих анизотропных нанокompозитных материалов триклинной системы.

5. Осуществлены разработка и теоретический анализ новых модификаций моделей функционирования цилиндрических функционально-градиентных анизотропных элементов систем экранирования гидроакустических преобразователей и антенн, включая разработку методик структурно-параметрической оптимизации их рабочих характеристик.

7. Предложены новые усовершенствованные модификации прикладных моделей структурно-параметрической оптимизации характеристик многосвязных перфорированных анизотропных пластинчатых элементов технических систем гидроакустического экранирования с герметизированными поперечными полостями.

8. Осуществлена разработка новой геометрически точной модели функционирования поперечно-анизотропного функционально-градиентного перфорированного гидроакустического экрана с герметизированными поперечными полостями при учете обусловленных гидростатическим давлением начальных деформаций в рамках линеаризованной теории сжимаемых предварительно-напряженных сред и предложена новая модификация численно-аналитического метода ее анализа и структурно-параметрической оптимизации с использованием рядов по базисным системам динамических однородных решений.

9. Впервые разработана и применена методика нечетко-множественного анализа факторов неопределенности в прикладной модели нечеткого оценивания рабочих характеристик перфорированных анизотропных гидроакустических экранов с герметизирующими покрытиями при учете неконтрастности физико-механических и геометрических экзогенных параметров.

10. Впервые предложены и исследованы нечеткие оптимизационные модели плоских анизотропных функционально-градиентных элементов технических систем гидроакустического экранирования с учетом факторов неопределенности параметров их конструктивного исполнения и функционирования.

11. Разработана новая численно-аналитическая методика моделирования и оптимизации рабочих характеристик пространственных пластинчатых элементов технических систем гидроакустического экранирования с внутренней перфорацией туннельными цилиндрическими полостями с газовоздушным либо упругим эластичным заполнением.

12. Осуществлена систематизация ряда новых исследованных физико-механических эффектов, представляющих интерес в предпроектных расчетах оптимизированных конструкционных элементов для технических систем подводного гидроакустического экранирования.

13. Предложены эффективные модифицированные варианты решения проблемы выбора оптимизированных конструкций гидроакустических экранов исследованного типа в технических системах с учетом комплекса условий, касающихся частотных диапазонов функционирования и ограничений по геометрическим и физико-механическим характеристикам.

14. Разработаны авторские комплексы программных приложений для компьютерной реализации предложенных теоретических методик исследования характеристик инновационных конструкций гидроакустических экранов с комплексом усложненных физико-механических и геометрических свойств.

Методы исследования. В работе использованы апробированные методы системного анализа, методы нечетко-множественного иерархического моделирования и анализа функциональных зависимостей с нечетко-множественными аргументами на основе применения эвристического принципа расширения, методы и алгоритмы многокритериальной структурно-параметрической оптимизации, теоретические методы гидроакустики и теории волновых процессов в функционально-градиентных анизотропных

композитных конструкционных элементах технических систем гидроакустического экранирования.

Достоверность результатов проведенных исследований подтверждается использованием в них строгих математических методов системного анализа, верифицированных методов теории нечетких множеств, методов математической физики, методологических основ структурно-параметрической оптимизации, апробированных моделей физико-механических процессов в ультразвуке; анализом результатов, получаемых на разных стадиях апробации разрабатываемых моделей и алгоритмов, в том числе, результатов компьютерного моделирования; согласованностью результатов, полученных для предельных частных случаев, с представленными в научной литературе результатами других исследований и опытными данными; теоретико-экспериментальными данными, полученными при внедрении и практическом использовании результатов в Техническом институте военно-морских сил Социалистической Республики Вьетнам.

Практическая ценность работы заключается в том, что разработанные в диссертации детерминистические и нечеткие математические модели, численно-аналитические методы их исследования, созданные программные приложения для реализации теоретических методик исследования характеристик конструкций гидроакустических экранов с комплексом усложненных физико-механических и геометрических свойств, а также закономерности и выводы, полученные в результате их применения, являются научной основой для принятия эффективных инновационных проектно-конструкторских технических решений, обеспечивающих в перспективе дальнейшее снижение гидроакустической активности подводных транспортных средств и подводных сооружений, а также повышение точности работы их гидроакустического приборного оснащения.

Реализация результатов работы.

Результаты диссертационной работы получили применение и внедрены на практике в ряде предприятий и проектно-конструкторских институтов различных стран. Основные теоретические положения проведенных исследований подтверждены при использовании в практической деятельности ряда проектно-конструкторских и технических организаций Вьетнама. В частности, созданные математические модели, методы их исследования и алгоритмы реализации, представленные расчетными методиками и комплексами прикладных программ, использовались:

- в научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах Технического института военно-морского флота Вьетнама;

- в учебных курсах «Системное проектирование» в Морском университете г. Хайфон, Вьетнам;

- в опытно-конструкторских работах научно-производственных компаний судостроительного сектора Вьетнама.

Апробация результатов работы.

Основные положения диссертации докладывались и обсуждались: на ряде Международных, региональных и ведомственных научных и научно-технических конференций, семинаров и совещаний, в том числе:

- на научно-технических семинарах в Научно-исследовательском и экспериментальном институте автомобильной электроники и электрооборудования Министерства промышленности и торговли РФ (г. Москва, 2012-2018гг.);

- на Международных научных и научно-практических конференциях, в том числе на Международной летней научной школе «Парадигма» (20-23 августа 2015г., г. Варна, Республика Болгария); на Международной научной конференции «Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики» (16 - 18 декабря 2015г., г. Воронеж, Воронежский государственный университет); на Международной научной конференции «Modern informatization problems in simulation and social technologies: the XXIII-th International Open Science Conference» (Yelm, WA, USA, January 2018); на VI и VII Международных

научно-практических интернет-конференциях «Современные тенденции развития математики и её прикладные аспекты – 2017» (г. Донецк, 26 мая 2017 г.), «Современные тенденции развития математики и её прикладные аспекты – 2018» (г. Донецк, 27 мая 2018 г.);

- на научно-практических конференциях в Технологическом университете г. Хошимин (СРВ), Национальном морском университете г. Хайфон (СРВ), в Научно-исследовательском техническом институте военно-морских сил Вьетнама (2012-2018гг.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 68 научных работ, в числе которых 13 статей в научно-технических изданиях, рекомендованных ВАК РФ; из них одна статья в издании, входящем в Международную наукометрическую базу **MathSciNet**, а также три монографии.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, одиннадцати глав, заключения с основными выводами и результатами по работе, списка литературы и приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности рассматриваемой проблемы, сформулированы цели и задачи исследования, представлена характеристика основных научных положений и результатов работы, а также их практической ценности и данных апробации.

Первая глава диссертационной работы посвящена общей характеристике и качественному анализу проблемы моделирования и системного анализа технических систем подводного гидроакустического экранирования. В ней последовательно изложены результаты исследований, относящихся к развернутой характеристике, формализации, постановке и подходам к решению проблем системного анализа и синтеза технических систем управления характеристиками гидроакустических сигналов, обусловленных собственной акустической активностью подводных транспортных средств и подводных сооружений, функционированием их приборного оснащения устройств локации и связи, а также факторами природного характера. Обобщены данные об источниках и методах снижения акустической активности подводных транспортных средств. Рассмотрены общие принципы и концептуальные подходы в решении задач проектирования и расчета гидроакустических экранов различной геометрической формы и целевого назначения. Представлены обзорные данные о современных конструктивных характеристиках технических систем подводного гидроакустического экранирования и подходах к их совершенствованию. Рассмотрены проблемные задания оптимизации параметров излучения и захвата сигналов в информационных гидроакустических системах, связанные с экранированием гидроакустических антенн и преобразователей, а также подставлена структурная классификация типологии гидроакустических помех. Приведена информация о научно-технических решениях в области методологий экранирования, характеризующихся как «акустический стелс». Представленные данные положены в основу предложений по совершенствованию технологических конструкторских решений в области дальнейшей оптимизации технических систем гидроакустического экранирования для подводных транспортных средств и сооружений, базирующихся, в первую очередь, на применении современных типов низкосимметричных анизотропных функционально-градиентных композиционных материалов.

Вторая глава диссертационной работы посвящена проблемам моделирования и оптимизации плоских элементов технических систем подводного гидроакустического экранирования из однородных материалов с общей физико-механической анизотропией. Базовым элементом реализуемых исследований является анализ модели функционирования однослойного экрана из материала рассматриваемого типа с плоскими гранями, который занимает область $V_S = \{0 \leq x_3 \leq h, (x_1, x_2) \in R^2\}$ и контактирует с полупространствами

$V_{F-} = \{x_3 < 0, (x_1, x_2) \in R^2\}$, $V_{F+} = \{x_3 > h, (x_1, x_2) \in R^2\}$ разнотипной идеальной слабосжимаемой жидкости. В модели рассматривается падение из глубины V_{F-} на поверхность $\Gamma_- = \{x_3 = 0, (x_1, x_2) \in R^2\}$ плоской гидроакустической волны с циклической частотой ω , вследствие которого в экранирующем вязкоупругом анизотропном слое триклинной системы формируется поле упругих колебаний с комплексными характеристиками динамических волновых перемещений $\tilde{u}_j = u_{j\alpha}(x_3) \exp(-i\omega t)$. Расчет модулей упругости в координатах $Ox_1x_2x_3$ для экрана, представленного сложным срезом разнотипных волокнистых, слоистых и зернистых композиционных материалов с армирующими компонентами микро- и наноразмеров, осуществляется с применением тензорного соотношения $c_{ijkl} = n_{ip}n_{jq}n_{kr}n_{ls}\tilde{c}_{pqrs}$, в котором $n_{11} = \cos\alpha \cdot \cos\beta \cdot \cos\gamma - \sin\beta \cdot \sin\gamma$, $n_{12} = \cos\alpha \cdot \sin\beta \cdot \cos\gamma + \cos\beta \cdot \sin\gamma$, $n_{13} = -\sin\alpha \cdot \cos\gamma$, $n_{21} = -\cos\alpha \cdot \sin\beta \cdot \sin\gamma - \sin\beta \cdot \cos\gamma$, $n_{22} = \cos\beta \cdot \cos\gamma - \cos\alpha \cdot \sin\beta \cdot \sin\gamma$, $n_{23} = \sin\alpha \cdot \sin\gamma$, $n_{31} = \sin\alpha \cdot \cos\beta$, $n_{32} = \sin\alpha \cdot \sin\beta$, $n_{33} = \cos\alpha$; \tilde{c}_{pqrs} – тензор модулей упругости в исходной вводимой при измерениях системе координат, c_{ijkl} – тензор модулей упругости в координатах, поворот которых характеризуется совокупностью углов Эйлера. Учет вязкости материала экрана в рассматриваемой модели реализован путем перехода к комплексным характеристикам модулей упругости, значения которых зависят от угловых параметров циклических энергетических потерь. Интегрирование системы обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned} c_{55}\partial_3^2 u_{1\alpha} + c_{54}\partial_3^2 u_{2\alpha} + c_{53}\partial_3^2 u_{3\alpha} + \rho\omega^2 u_{1\alpha} &= 0, \\ c_{45}\partial_3^2 u_{1\alpha} + c_{44}\partial_3^2 u_{2\alpha} + c_{43}\partial_3^2 u_{3\alpha} + \rho\omega^2 u_{2\alpha} &= 0, \\ c_{35}\partial_3^2 u_{\alpha 1} + c_{34}\partial_3^2 u_{2\alpha} + c_{33}\partial_3^2 u_{3\alpha} + \rho\omega^2 u_{3\alpha} &= 0, \quad \partial_3 = \partial / \partial x_3, \end{aligned}$$

относительно амплитудных составляющих волновых упругих колебаний в экранирующем слое приводит к следующим представлениям для используемых в модели и содержащих шесть неопределенных коэффициентов $A_p^{(\pm)}$ характеристик напряженно-деформированного

$$\begin{aligned} \text{состояния экрана: } (u_{j\alpha})_{(x_1, x_2, x_3) \in V_S} &= G_{uj}(x_3) = [A_1^{(+)} \hat{u}_{j1}^{(+)} e^{k_1^{(+)} x_3} + \\ &+ A_1^{(-)} \hat{u}_{j1}^{(-)} e^{k_1^{(-)} x_3} + A_2^{(+)} \hat{u}_{j2}^{(+)} e^{k_2^{(+)} x_3} + A_2^{(-)} \hat{u}_{j2}^{(-)} e^{k_2^{(-)} x_3} + A_3^{(+)} \hat{u}_{j3}^{(+)} e^{k_3^{(+)} x_3} + A_3^{(-)} \hat{u}_{j3}^{(-)} e^{k_3^{(-)} x_3}], \\ ((\partial \tilde{u}_j / \partial t) e^{i\omega t})_{(x_1, x_2, x_3) \in V_S} &= G_{ujt}(x_3) = (-i\omega) [A_1^{(+)} \hat{u}_{j1}^{(+)} e^{k_1^{(+)} x_3} + A_1^{(-)} \hat{u}_{j1}^{(-)} e^{k_1^{(-)} x_3} + A_2^{(+)} \hat{u}_{j2}^{(+)} e^{k_2^{(+)} x_3} + \\ &+ A_2^{(-)} \hat{u}_{j2}^{(-)} e^{k_2^{(-)} x_3} + A_3^{(+)} \hat{u}_{j3}^{(+)} e^{k_3^{(+)} x_3} + A_3^{(-)} \hat{u}_{j3}^{(-)} e^{k_3^{(-)} x_3}], \quad (\sigma_{3j\alpha})_{(x_1, x_2, x_3) \in V_S} = G_{\sigma j}(x_3) = \\ &= \sum_{p=1}^3 [A_p^{(+)} k_p^{(+)} (c_{6-j,5} \hat{u}_{1p}^{(+)} + c_{6-j,4} \hat{u}_{2p}^{(+)} + c_{6-j,3} \hat{u}_{3p}^{(+)}) e^{k_p^{(+)} x_3} + A_p^{(-)} k_p^{(-)} (c_{6-j,5} u_{1p}^{(-)} + \\ &+ c_{6-j,4} \hat{u}_{2p}^{(-)} + c_{6-j,3} \hat{u}_{3p}^{(-)}) e^{k_p^{(-)} x_3}]. \end{aligned}$$

Характеристики рассматриваемых полей стационарных гидроакустических волн в виде компонентов вектора скоростей \vec{v} колебательных смещений частиц акустической среды и акустического давления P в областях V_{F-} , V_{F+} , занимаемых жидкостями с параметрами плотности в невозмущенном состоянии $\rho_0^{(\pm)}$ и адиабатическими модулями сжимаемости $\kappa^{(\pm)}$, выражаются через потенциалы $\varphi^{(\pm)}$, удовлетворяющие уравнениям $\Delta \varphi^{(\pm)} = (c_0^{(\pm)})^{-2} \partial_t^2 \varphi^{(\pm)}$, $c_0^{(\pm)} = (\kappa^{(\pm)} \rho_0^{(\pm)})^{-1/2}$, и имеют комплексные представления

$$\begin{aligned} (v_3)_{(x_1, x_2, x_3) \in V_{F-}} &= G_V^{(-)}(x_3) = ik_F^{(-)} (-\varphi_{01}^{(-)} \exp(ik_F^{(-)} x_3) + \varphi_{02}^{(-)} \cdot \exp(-ik_F^{(-)} x_3)) = G_{1V}^{(-)}(x_3) + G_{2V}^{(-)}(x_3) \\ (P)_{(x_1, x_2, x_3) \in V_{F-}} &= G_P^{(-)}(x_3) = (-i\omega \rho_0^{(-)}) (\varphi_{01}^{(-)} \exp(ik_F^{(-)} x_3) + \varphi_{02}^{(-)} \exp(-ik_F^{(-)} x_3)) = G_{1P}^{(-)}(x_3) + G_{2P}^{(-)}(x_3) \\ (v_3)_{(x_1, x_2, x_3) \in V_{F-}} &= G_V^{(+)}(x_3) = -ik_F^{(+)} \varphi_0^{(+)} \exp(ik_F^{(+)} x_3), \quad (P)_{(x_1, x_2, x_3) \in V_{F-}} = G_P^{(+)}(x_3) = (-i\omega \rho_0^{(+)}). \end{aligned}$$

· $\varphi_0^{(+)} \exp(ik_F^{(+)} x_3)$ с заданным амплитудным параметром падающей волны $\varphi_{01}^{(-)}$ и подлежащими определению амплитудными параметрами отраженной $\varphi_{02}^{(-)}$ и генерируемой в пространстве за экраном $\varphi_0^{(+)}$ волн.

Рассматриваемая в главе модель взаимодействия плоской волны давления с экраном в виде пакета различных по физико-механическим свойствам идеально контактирующих анизотропных слоев триклинной системы исследована на основе введения векторов граничных амплитудных значений характеристик деформирования. Для слоя с номером q , контактирующего со смежным деформируемым твердым слоем, вектор имеет представление $\hat{G}_{SS}^{(q)}(x_3) = (\tilde{u}_1(x_3), \tilde{u}_2(x_3), \tilde{u}_3(x_3), \tilde{\sigma}_{31}^{(q)}(x_3), \tilde{\sigma}_{32}^{(q)}(x_3), \tilde{\sigma}_{33}^{(q)}(x_3))$, а для слоя с номером q , граничащего с жидкостью, соответствующий вектор имеет вид $\hat{G}_{SF}^{(q)}(x_3) = (\tilde{\sigma}_{31}^{(q)}(x_3), \tilde{\sigma}_{32}^{(q)}(x_3), \tilde{\sigma}_{33}^{(q)}(x_3), \partial_1 \tilde{u}_3(x_3))$. Система граничных соотношений для случая экрана произвольной N -слойной структуры с поверхностями раздела сопрягаемых деформируемых компонентов $x_3 = h_n$ ($n = \overline{1, N-1}$) и поверхностями контакта твердотельных компонентов с окружающей жидкостью $x_3 = 0$ и $x_3 = h_N$ получена в виде

$$\hat{G}_F^{(1)}(0) = \hat{G}_{SF}^{(1)}(0), \hat{G}_{SS}^{(1)}(h_1) = \hat{G}_{SS}^{(2)}(h_1), \hat{G}_{SS}^{(2)}(h_2) = \hat{G}_{SS}^{(3)}(h_2), \dots, \\ \hat{G}_{SS}^{(n)}(h_n) = \hat{G}_{SS}^{(n+1)}(h_n), \dots, \hat{G}_{SS}^{(N-1)}(h_{N-1}) = \hat{G}_{SS}^{(N)}(h_{N-1}), \hat{G}_{SF}^{(N)}(h_N) = \hat{G}_F^{(2)}(h_N).$$

Данные соотношения трансформируются в систему линейных алгебраических уравнений для коэффициентов представлений деформационных полей в анизотропных слоях экранирующего пакета и искомым амплитудным параметрам гидроакустических волн в V_{F-} , V_{F+} , записываемую в форме $\check{M}(c_{ij}^{(n)}, \rho^{(n)}, \kappa_{F\pm}, \rho_{F\pm}, \omega, h_n) \cdot \check{F}_E = \check{F}_I$, где $\check{M}(c_{ij}^{(n)}, \rho^{(n)}, \kappa_{F1}, \rho_{F1}, \kappa_{F2}, \rho_{F2}, \omega, h_n) = \|\check{m}_{ij}\|$ – матрица порядка $6 \cdot N + 2$ с блочно-ленточной структурой; \check{F}_E – вектор искомым характеристикам со структурой $\check{F}_E = (A_{11}^{(+)}, A_{11}^{(-)}, A_{21}^{(+)}, A_{21}^{(-)}, A_{21}^{(+)}, A_{21}^{(-)}, A_{31}^{(+)}, A_{31}^{(-)}, \dots, A_{1n}^{(+)}, A_{1n}^{(-)}, A_{2n}^{(+)}, A_{2n}^{(-)}, A_{3n}^{(+)}, A_{3n}^{(-)}, \dots, A_{1N}^{(+)}, A_{1N}^{(-)}, A_{2N}^{(+)}, A_{2N}^{(-)}, A_{3N}^{(+)}, A_{3N}^{(-)}, \varphi_{02}^{(-)}, \varphi_{01}^{(+)})$; \check{F}_I – вектор размерности $6 \cdot N + 2$ вида $\check{F}_I = (0, 0, 0, \dots, 0, 0, 0, \check{\delta}_1, \check{\delta}_2) \varphi_{01}^{(-)}$. Решение системы записано в виде $\check{F}_E = [\check{M}(c_{ij}^{(n)}, \rho^{(n)}, \kappa_{F\pm}, \rho_{F\pm}, \omega, h_n)]^{-1} \cdot \check{F}_I$ и позволяет получить удобные для исследования представления для характеристик эффективности экранирования

$$\varphi_{02}^{(-)} = \check{\Delta}_o(c_{ij}^{(n)}, \rho^{(n)}, \kappa_{F\pm}, \rho_{F\pm}, \omega, h_n) \varphi_{01}^{(-)}, \varphi_0^{(+)} = \check{\Delta}_p(c_{ij}^{(n)}, \rho^{(n)}, \kappa_{F\pm}, \rho_{F\pm}, \omega, h_n) \varphi_{01}^{(-)}.$$

Далее описанная методика последовательно применена для анализа модели многослойного экрана с мембранированными поверхностями контакта анизотропных деформируемых компонентов и для исследования модели многослойного экрана из анизотропных деформируемых компонентов с жидкостными прослойками.

В заключительных подразделах главы с использованием полученных представлений амплитудных составляющих волновых упругих колебаний в экранирующем слое и в областях, занимаемых жидкостями, последовательно реализовано параметрическое исследование характеристик однослойного вязкоупругого экрана из материала триклинной системы на основе анализа системы соотношений $G_{\sigma_3}(0) - G_{2P}^{(-)}(0) = G_{1P}^{(-)}(0)$, $G_{u_{3t}}(0) - G_{2V}^{(-)}(0) = G_{1V}^{(-)}(0)$, $G_{\sigma_1}(0) = 0$, $G_{\sigma_2}(0) = 0$, $G_{\sigma_1}(h) = 0$, $G_{\sigma_2}(h) = 0$; $G_{\sigma_3}(h) - G_P^{(+)}(h) = 0$, $G_{u_{3t}}(h) - G_V^{(+)}(h) = 0$; двухслойного вязкоупругого экрана из разнотипных по свойствам составляющих толщины h_1 и $h_2 - h_1$ на основе анализа систем соотношений

$$G_{\sigma_3}^{(1)}(0) - G_{2P}^{(-)}(0) = G_{1P}^{(-)}(0), G_{u_{3t}}^{(1)}(0) - G_{2V}^{(-)}(0) = G_{1V}^{(-)}(0), G_{\sigma_1}^{(1)}(0) = 0, G_{\sigma_2}^{(1)}(0) = 0, \\ G_{u_1}^{(1)}(h_1) = G_{u_1}^{(2)}(h_1), G_{u_2}^{(1)}(h_1) = G_{u_2}^{(2)}(h_1), G_{u_3}^{(1)}(h_1) = G_{u_3}^{(2)}(h_1), G_{\sigma_1}^{(1)}(h_1) = G_{\sigma_1}^{(2)}(h_1), G_{\sigma_2}^{(1)}(h_1) = G_{\sigma_2}^{(2)}(h_1), \\ G_{\sigma_3}^{(1)}(h_1) = G_{\sigma_3}^{(2)}(h_1), G_{\sigma_3}^{(2)}(h_2) - G_P^{(+)}(h_2) = 0, G_{u_{3t}}^{(2)}(h_2) - G_V^{(+)}(h_2) = 0, G_{\sigma_1}^{(2)}(h_2) = 0, G_{\sigma_2}^{(2)}(h_2) = 0;$$

$$G_{\sigma_3}^{(1)}(0) - G_{2P}^{(-)}(0) = G_{1P}^{(-)}(0), \quad G_{u_{3t}}^{(1)}(0) - G_{2V}^{(-)}(0) = G_{1V}^{(-)}(0), \quad G_{\sigma_1}^{(1)}(0) = 0, \quad G_{\sigma_2}^{(1)}(0) = 0,$$

$$G_{u_3}^{(1)}(h_1) = G_{u_3}^{(2)}(h_1), \quad G_{\sigma_1}^{(1)}(h_1) = 0, \quad G_{\sigma_1}^{(2)}(h_1) = 0, \quad G_{\sigma_2}^{(1)}(h_1) = 0, \quad G_{\sigma_2}^{(2)}(h_1) = 0, \quad G_{\sigma_3}^{(1)}(h_1) = G_{\sigma_3}^{(2)}(h_1),$$

$$G_{\sigma_3}^{(2)}(h_2) - G_P^{(+)}(h_2) = 0, \quad G_{u_{3t}}^{(2)}(h_2) - G_V^{(+)}(h_2) = 0, \quad G_{\sigma_1}^{(2)}(h_2) = 0, \quad G_{\sigma_2}^{(2)}(h_2) = 0,$$

а также двухслойного вязкоупругого экрана с прослойкой жидкости. С использованием разработанных специализированных программных приложений исследован ряд ведущих эффектов и закономерностей влияния параметрических и структурных особенностей экранов на амплитудные характеристики отраженной и генерируемой за экраном гидроакустических волн с оценкой эффективности их функционирования в различных частотных диапазонах волновых воздействий соответственно целевому назначению. Рассмотрен комплекс вопросов структурно-параметрической оптимизации характеристик плоских гидроакустических экранов из анизотропных вязкоупругих материалов триклинной системы.

В третьей главе диссертации рассмотрен комплекс задач в области моделирования и оптимизации характеристик плоских трансверсально-изотропных функционально-градиентных гидроакустических экранов с экспоненциальной неоднородностью физико-механических характеристик $\tilde{c}_{ij} = c_{ij} \cdot \exp(\lambda x_3)$, $\tilde{\rho} = \rho \exp(\lambda x_3)$. На исходном этапе исследования получены аналитические представления для используемых в модели характеристик напряженно-деформированного состояния экрана при нормальном падении гидроакустической волны с частотой ω : $(u_{3\alpha})_{(x_1, x_2, x_3) \in V_S} = G_u(x_3) = (u_-(\alpha/\omega) \exp(-i\alpha x_3) +$

$$+ u_+(\alpha/\omega) \exp(i\alpha x_3)) \exp(-(\lambda/2)x_3) = G_{u-}(x_3) + G_{u+}(x_3), \quad ((\partial \tilde{u}_3 / \partial t) e^{i\omega t})_{(x_1, x_2, x_3) \in V_S} = G_{ut}(x_3) =$$

$$= (-i\alpha)(u_- \exp(-i\alpha x_3) + u_+ \exp(i\alpha x_3)) \exp(-(\lambda/2)x_3) = G_{ut-}(x_3) + G_{ut+}(x_3),$$

$$(\sigma_{3j\alpha})_{(x_1, x_2, x_3) \in V_S} = G_\sigma(x_3) = (c_{33}/\omega)((-i\alpha^2 - \alpha\lambda/2) \cdot u_- \exp((\lambda/2 - i\alpha)x_3) +$$

$$+ (i\alpha^2 - \alpha\lambda/2) \cdot u_+ \exp((\lambda/2 + i\alpha)x_3)) = G_{\sigma-}(x_3) + G_{\sigma+}(x_3),$$

в которых u_- , u_+ – неопределенные коэффициенты; $\alpha = (\rho\omega^2 h_*^2 c_{33}^{-1} - \lambda^2/4)^{1/2}$.

С применением полученных представлений, а также представлений характеристик гидроакустических волн в занимаемых жидкостями областях V_{F-} , V_{F+} , последовательно реализованы: численно-аналитическое исследование и параметрический анализ модели однослойного трансверсально-изотропного функционально-градиентного экрана с использованием системы граничных соотношений $G_\sigma(0) = G_P^{(-)}(0)$, $G_{ut}(0) = G_V^{(-)}(0)$, $G_\sigma(h_1) = G_P^{(+)}(h_1)$, $G_{ut}(h_1) = G_V^{(+)}(h_1)$; исследование и параметрический анализ модели двухслойного трансверсально-изотропного функционально-градиентного экрана с граничными плоскостями $x_3 = 0$, $x_3 = h_2$ и плоскостью идеального контакта слоев $x_3 = h_1$ с применением системы граничных соотношений $G_\sigma^{(1)}(0) = G_P^{(-)}(0)$, $G_{ut}^{(1)}(0) = G_V^{(-)}(0)$, $G_\sigma^{(1)}(h_1) = G_\sigma^{(2)}(h_1)$, $G_{ut}^{(1)}(h_1) = G_{ut}^{(2)}(h_1)$, $G_\sigma^{(2)}(h_2) = G_P^{(+)}(h_2)$, $G_{ut}^{(2)}(h_2) = G_V^{(+)}(h_2)$; исследование и параметрический анализ модели трехслойного трансверсально-изотропного функционально-градиентного экрана с граничными плоскостями $x_3 = 0$, $x_3 = h_3$ и плоскостями идеального контакта слоев $x_3 = h_1$, $x_3 = h_2$ с применением системы граничных соотношений $G_\sigma^{(1)}(0) = G_P^{(-)}(0)$, $G_{ut}^{(1)}(0) = G_V^{(-)}(0)$, $G_\sigma^{(1)}(h_1) = G_\sigma^{(2)}(h_1)$, $G_{ut}^{(1)}(h_1) = G_{ut}^{(2)}(h_1)$, $G_\sigma^{(2)}(h_2) = G_\sigma^{(3)}(h_2)$, $G_{ut}^{(2)}(h_2) = G_{ut}^{(3)}(h_2)$, $G_\sigma^{(3)}(h_3) = G_P^{(+)}(h_3)$, $G_{ut}^{(3)}(h_3) = G_V^{(+)}(h_3)$. В частности для ряда вариантов рассматриваемых конструкций исследованы параметрические зависимости амплитуд потенциалов отраженной и генерируемой за экраном гидроакустических волн от значений параметра неоднородности λ . Отдельные полученные зависимости этого типа в случаях изменения λ в диапазонах $-1 \leq \lambda \leq 0$ и $0 \leq \lambda \leq 1$ для экрана с фиксированными приведенными характеристиками $\kappa^{(\pm)} = 1.73$; $\rho_0^{(\pm)} = 1.0$; $c_{33}^* = 0.81$; $c_{33}^{**} = 0.$; $\rho = 2.0$; $h = 1.0$

при падении на него гидроакустической волны с приведенной циклической частотой $\omega = 1.0$ приведены на рис. 1, 2, где $g_1 = \left| \varphi_{02}^{(-)} / \varphi_{01}^{(-)} \right|$, $g_2 = \left| \varphi_0^{(+)} / \varphi_{01}^{(-)} \right|$.

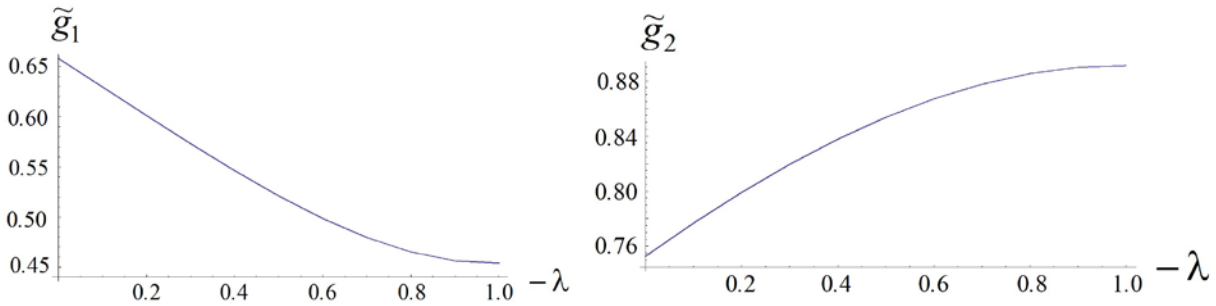


Рис. 1. Значения \tilde{g}_1 , \tilde{g}_2 при уменьшении показателя λ от $\lambda = 0$. до

$\lambda = -1$.

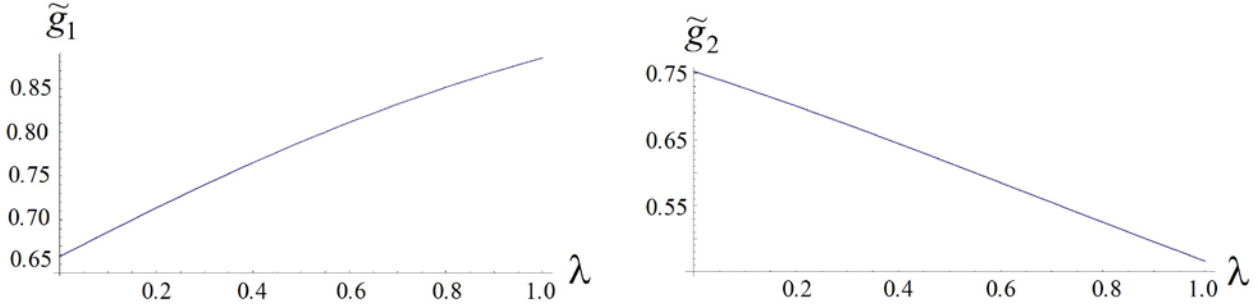


Рис. 2. Значения \tilde{g}_1 , \tilde{g}_2 при увеличении показателя λ от $\lambda = 0$. до $\lambda = 1$.

Далее рассмотрен параметрический анализ модели двухслойного трансверсально-изотропного функционально-градиентного экрана с жидкостной прослойкой L , базирующийся на использовании системы граничных соотношений

$$G_{\sigma}^{(1)}(0) = G_P^{(-)}(0), G_{u}^{(1)}(0) = G_V^{(-)}(0), G_{\sigma}^{(1)}(h_1) = G_P^{(L)}(h_1), G_{u}^{(1)}(h_1) = G_V^{(L)}(h_1),$$

$$G_{\sigma}^{(2)}(h_2) = G_P^{(L)}(h_2), G_{u}^{(2)}(h_2) = G_V^{(L)}(h_2), G_{\sigma}^{(2)}(h_3) = G_P^{(+)}(h_3), G_{u}^{(2)}(h_3) = G_V^{(+)}(h_3),$$

в которых $G_P^{(L)}(x_3) = (-i\omega\rho_0^{(L)}) (\varphi_{01}^{(L)} \exp(ik_F^{(L)}x_3) + \varphi_{02}^{(L)} \exp(-ik_F^{(L)}x_3)) = G_{1P}^{(L)}(x_3) + G_{2P}^{(L)}(x_3)$,

$$G_V^{(L)}(x_3) = ik_F^{(L)}(-\varphi_{01}^{(L)} \exp(ik_F^{(L)}x_3) + \varphi_{02}^{(L)} \cdot \exp(-ik_F^{(L)}x_3)) = G_{1V}^{(L)}(x_3) + G_{2V}^{(L)}(x_3).$$

В заключительном подразделе главы 2 представлена разработка методики исследования и структурно-параметрической оптимизации модели трансверсально-изотропного функционально-градиентного экрана с произвольным числом твердотельных слоев.

С использованием специализированных программных приложений, разработанных для реализации предложенных методик, исследован ряд ведущих эффектов и закономерностей влияния параметрических и структурных особенностей экранов на амплитудные характеристики отраженной и генерируемой за экраном гидроакустических волн с оценкой эффективности их функционирования в различных частотных диапазонах соответственно целевому назначению. Рассмотрены вопросы структурно-параметрической оптимизации характеристик плоских гидроакустических экранов из трансверсально-изотропных функционально-градиентных вязкоупругих материалов.

Глава 4 диссертационной работы содержит результаты в области разработки и апробации численно-аналитических методов исследования моделей функционирования и структурно-параметрической оптимизации характеристик плоских гидроакустических экранов из функционально-градиентных анизотропных вязкоупругих материалов триклинной системы с экспоненциальной неоднородностью. В ее первом и втором подразделах представлена методика аналитического исследования и результаты параметрического численного анализа моделей однослойного экрана из материала

рассматриваемого типа с плоскими гранями, на которых имеются либо отсутствуют тонкие нерастяжимые мембранные покрытия. Экран занимает область $V_S = \{0 \leq x_3 \leq h, (x_1, x_2) \in R^2\}$, контактирует с разнотипными полупространствами $V_{F-} = \{x_3 < 0, (x_1, x_2) \in R^2\}$, $V_{F+} = \{x_3 > h, (x_1, x_2) \in R^2\}$ идеальной слабосжимаемой жидкости и имеет физико-механические характеристики вида $\tilde{c}_{ij}(x_3) = c_{ij} \cdot \exp(\lambda x_3)$, $c_{ij} = c_{ji}$ ($i, j = \overline{1,6}$), $\tilde{\rho}(x_3) = \rho \cdot \exp(\lambda x_3)$, в которых λ – параметр неоднородности, $c_{ij} = c_{ij}^{(0)} \exp(-\psi_{ij}) = c_{ij}^* + ic_{ij}^{**}$. Полученные для рассматриваемой модели амплитудные характеристики напряженно-деформированного состояния экранирующего слоя, обусловленного падением из глубины V_{F-} на поверхность $\Gamma_- = \{x_3 = 0, (x_1, x_2) \in R^2\}$ плоской гидроакустической волны, имеют вид

$$G_{uj}(x_3) = [A_1^{(+)} \hat{u}_{j1}^{(+)} e^{k_1^{(+)} x_3} + A_1^{(-)} \hat{u}_{j1}^{(-)} e^{k_1^{(-)} x_3} + A_2^{(+)} \hat{u}_{j2}^{(+)} e^{k_2^{(+)} x_3} + A_2^{(-)} \hat{u}_{j2}^{(-)} e^{k_2^{(-)} x_3} + A_3^{(+)} \hat{u}_{j3}^{(+)} e^{k_3^{(+)} x_3} + A_3^{(-)} \hat{u}_{j3}^{(-)} e^{k_3^{(-)} x_3}]$$

$$, G_{ujt}(x_3) = (-i\omega) [A_1^{(+)} \hat{u}_{j1}^{(+)} e^{k_1^{(+)} x_3} + A_1^{(-)} \hat{u}_{j1}^{(-)} e^{k_1^{(-)} x_3} +$$

$$+ A_2^{(+)} \hat{u}_{j2}^{(+)} e^{k_2^{(+)} x_3} + A_2^{(-)} \hat{u}_{j2}^{(-)} e^{k_2^{(-)} x_3} + A_3^{(+)} \hat{u}_{j3}^{(+)} e^{k_3^{(+)} x_3} + A_3^{(-)} \hat{u}_{j3}^{(-)} e^{k_3^{(-)} x_3}] , G_{\sigma j}(x_3) = \sum_{p=1}^3 [A_p^{(+)} k_p^{(+)} (c_{6-j,5} \hat{u}_{1p}^{(+)} +$$

$$+ c_{6-j,4} \hat{u}_{2p}^{(+)} + c_{6-j,3} \hat{u}_{3p}^{(+)}) e^{k_p^{(+)} x_3} + A_p^{(-)} k_p^{(-)} (c_{6-j,5} \hat{u}_{1p}^{(-)} + c_{6-j,4} \hat{u}_{2p}^{(-)} + c_{6-j,3} \hat{u}_{3p}^{(-)}) e^{k_p^{(-)} x_3}] e^{\lambda x_3} ,$$

и содержат шесть подлежащих определению произвольных коэффициентов $A_p^{(\pm)}$. С использованием этих выражений, а также полученных в предыдущих главах выражений для амплитудных характеристик полей гидроакустических волн в полупространствах жидкости, последовательно записаны и исследованы применительно к рассматриваемым вариантам моделей системы соотношений, следующих из краевых условий и трансформирующихся в системы алгебраических уравнений для неопределенных коэффициентов в представлениях волновых полей: для однослойного экрана без покрытий на гранях $G_{\sigma_3}(0) - G_{2p}^{(-)}(0) = G_{1p}^{(-)}(0)$, $G_{u_{3t}}(0) - G_{2v}^{(-)}(0) = G_{1v}^{(-)}(0)$, $G_{\sigma_1}(0) = 0$, $G_{\sigma_2}(0) = 0$, $G_{\sigma_1}(h) = 0$, $G_{\sigma_2}(h) = 0$; $G_{\sigma_3}(h) - G_p^{(+)}(h) = 0$, $G_{u_{3t}}(h) - G_v^{(+)}(h) = 0$; для однослойного экрана с покрытием на поверхности Γ_- лицевой грани $G_{\sigma_3}(0) - G_{2p}^{(-)}(0) = G_{1p}^{(-)}(0)$, $G_{u_{3t}}(0) - G_{2v}^{(-)}(0) = G_{1v}^{(-)}(0)$, $G_{u_1}(0) = 0$, $G_{u_2}(0) = 0$, $G_{\sigma_1}(h) = 0$, $G_{\sigma_2}(h) = 0$; $G_{\sigma_3}(h) - G_p^{(+)}(h) = 0$, $G_{u_{3t}}(h) - G_v^{(+)}(h) = 0$; для однослойного экрана с покрытием на поверхности Γ_+ тыльной грани $G_{\sigma_3}(0) - G_{2p}^{(-)}(0) = G_{1p}^{(-)}(0)$, $G_{u_{3t}}(0) - G_{2v}^{(-)}(0) = G_{1v}^{(-)}(0)$, $G_{\sigma_1}(0) = 0$, $G_{\sigma_2}(0) = 0$, $G_{u_1}(h) = 0$, $G_{u_2}(h) = 0$; $G_{\sigma_3}(h) - G_p^{(+)}(h) = 0$, $G_{u_{3t}}(h) - G_v^{(+)}(h) = 0$; для однослойного экрана с покрытиями на обеих гранях $G_{\sigma_3}(0) - G_{2p}^{(-)}(0) = G_{1p}^{(-)}(0)$, $G_{u_{3t}}(0) - G_{2v}^{(-)}(0) = G_{1v}^{(-)}(0)$, $G_{u_1}(0) = 0$, $G_{u_2}(0) = 0$, $G_{u_1}(h) = 0$, $G_{u_2}(h) = 0$; $G_{\sigma_3}(h) - G_p^{(+)}(h) = 0$, $G_{u_{3t}}(h) - G_v^{(+)}(h) = 0$.

В последующих подразделах получены и исследованы системы граничных соотношений для двухслойного экрана из разнотипных по свойствам составляющих толщины h_1 и $h_2 - h_1$ с не имеющими покрытий внешними гранями и мембранированной контактной поверхностью $G_{\sigma_3}^{(1)}(0) - G_{2p}^{(-)}(0) = G_{1p}^{(-)}(0)$, $G_{u_{3t}}^{(1)}(0) - G_{2v}^{(-)}(0) = G_{1v}^{(-)}(0)$, $G_{\sigma_1}^{(1)}(0) = 0$, $G_{\sigma_2}^{(1)}(0) = 0$, $G_{u_3}^{(1)}(h_1) = G_{u_3}^{(2)}(h_1)$, $G_{u_1}^{(1)}(h_1) = 0$, $G_{u_1}^{(2)}(h_1) = 0$, $G_{u_2}^{(1)}(h_1) = 0$, $G_{u_2}^{(2)}(h_1) = 0$, $G_{\sigma_3}^{(1)}(h_1) = G_{\sigma_3}^{(2)}(h_1)$, $G_{\sigma_3}^{(2)}(h_2) - G_p^{(+)}(h_2) = 0$, $G_{u_{3t}}^{(2)}(h_2) - G_v^{(+)}(h_2) = 0$, $G_{\sigma_1}^{(2)}(h_2) = 0$, $G_{\sigma_2}^{(2)}(h_2) = 0$; для двухслойного экрана с не имеющими покрытий внешними гранями и с немембранированной контактной поверхностью идеального механического сопряжения слоев $G_{\sigma_3}^{(1)}(0) - G_{2p}^{(-)}(0) = G_{1p}^{(-)}(0)$, $G_{u_{3t}}^{(1)}(0) - G_{2v}^{(-)}(0) = G_{1v}^{(-)}(0)$, $G_{\sigma_1}^{(1)}(0) = 0$, $G_{\sigma_2}^{(1)}(0) = 0$, $G_{u_1}^{(1)}(h_1) = G_{u_1}^{(2)}(h_1)$, $G_{u_2}^{(1)}(h_1) = G_{u_2}^{(2)}(h_1)$, $G_{u_3}^{(1)}(h_1) = G_{u_3}^{(2)}(h_1)$, $G_{\sigma_1}^{(1)}(h_1) = G_{\sigma_1}^{(2)}(h_1)$, $G_{\sigma_2}^{(1)}(h_1) = G_{\sigma_2}^{(2)}(h_1)$,

$$G_{\sigma_3}^{(1)}(h_1) = G_{\sigma_3}^{(2)}(h_1), \quad G_{\sigma_3}^{(2)}(h_2) - G_P^{(+)}(h_2) = 0, \quad G_{u_{3t}}^{(2)}(h_2) - G_V^{(+)}(h_2) = 0, \quad G_{\sigma_1}^{(2)}(h_2) = 0, \quad G_{\sigma_2}^{(2)}(h_2) = 0;$$

а также для двухслойного экрана с элементами толщины h_1 и $h_3 - h_2$, и с имеющей толщину $h_2 - h_1$ жидкостной прослойкой

$$G_{\sigma_3}^{(1)}(0) - G_{2P}^{(-)}(0) = G_{1P}^{(-)}(0), \quad G_{u_{3t}}^{(1)}(0) - G_{2V}^{(-)}(0) = G_{1V}^{(-)}(0),$$

$$G_{\sigma_1}^{(1)}(0) = 0, \quad G_{\sigma_2}^{(1)}(0) = 0, \quad G_{\sigma_3}^{(1)}(h_1) - G_P^{(L)}(h_1) = 0, \quad G_{u_{3t}}^{(1)}(h_1) - G_V^{(L)}(h_1) = 0, \quad G_{\sigma_1}^{(1)}(h_1) = 0, \quad G_{\sigma_2}^{(1)}(h_1) = 0,$$

$$G_{\sigma_3}^{(2)}(h_2) - G_P^{(L)}(h_2) = 0, \quad G_{u_{3t}}^{(2)}(h_2) - G_V^{(L)}(h_2) = 0, \quad G_{\sigma_1}^{(2)}(h_2) = 0, \quad G_{\sigma_2}^{(2)}(h_2) = 0,$$

$$G_{\sigma_3}^{(2)}(h_3) - G_P^{(+)}(h_3) = 0, \quad G_{u_{3t}}^{(2)}(h_3) - G_V^{(+)}(h_3) = 0, \quad G_{\sigma_1}^{(2)}(h_3) = 0, \quad G_{\sigma_2}^{(2)}(h_3) = 0.$$

На основе разработки и применения специализированного программного приложения описан ряд установленных в результате исследований эффектов и закономерностей влияния параметрических и структурных особенностей рассматриваемых конструктивных элементов на определяемые путем анализа граничных соотношений амплитудные характеристики отраженной и генерируемой за экраном гидроакустических волн. Получены оценки эффективности функционирования соответствующих технических систем подводного гидроакустического экранирования в различных частотных диапазонах волновых воздействий в зависимости от целевого назначения исследуемых систем. Рассмотрен комплекс вопросов структурно-параметрической оптимизации характеристик плоских гидроакустических экранов из функционально-градиентных анизотропных вязкоупругих материалов триклинной системы с экспоненциальной неоднородностью.

Пятая глава работы посвящена проблемам теоретического моделирования и оптимизации плоских элементов технических систем подводного экранирования из функционально-градиентных вязкоупругих анизотропных материалов триклинной системы с экспоненциально-степенной неоднородностью. Отмечено, что данный тип функциональных зависимостей физико-механических характеристик плоских экранов от толщинной координаты позволяет моделировать случаи в различной степени выраженной локализации зон упрочнения и уплотнения, либо разупрочнения и разуплотнения материалов вблизи граней экранирующего слоя. В качестве общего элемента для последующего анализа ряда моделей рассматриваемого типа с различными структурно-конструктивными особенностями разработана методика численно-аналитического исследования и параметрической оптимизации двух базовых вариантов. Первым является модель однослойного экрана из функционально-градиентного вязкоупругого анизотропного материала с физико-механическими характеристиками вида $\tilde{c}_{ij}(x_3) = c_{ij} \cdot \exp(\lambda x_3^p)$, $c_{ij} = c_{ji}$ ($i, j = \overline{1,6}$; $p \geq 2$), $\tilde{\rho}(x_3) = \rho \cdot \exp(\lambda x_3^p)$, занимающего область $V_S = \{0 \leq x_3 \leq h, (x_1, x_2) \in R^2\}$ и контактирующего с разнотипными полупространствами $V_{F-} = \{x_3 < 0, (x_1, x_2) \in R^2\}$, $V_{F+} = \{x_3 > h, (x_1, x_2) \in R^2\}$ идеальной слабосжимаемой жидкости. Вторым – модель однослойного экрана из материала с характеристиками вида $\tilde{c}_{ij}(x_3) = c_{ij} \cdot \exp(\lambda(x_3 - h/2)^p)$, $c_{ij} = c_{ji}$ ($i, j = \overline{1,6}$; $p \geq 2$), $\tilde{\rho}(x_3) = \rho \cdot \exp(\lambda(x_3 - h/2)^p)$, занимающего область $V_S = \{(x_1, x_2) \in R^2, x_3 \in [-h/2, h/2]\}$ между жидкостными полупространствами $V_{F-} = \{(x_1, x_2) \in R^2, x_3 \in (-\infty, -h/2)\}$, $V_{F+} = \{(x_1, x_2) \in R^2, x_3 \in (h/2, \infty)\}$.

Рассматриваются случаи падения из глубины V_{F-} на границу контакта V_{F-} и V_S плоской волны гидроакустической давления и генерирования в области V_{F+} за экраном прошедшей волны давления. Процессы распространения гидроакустических волн, как и в предшествующих главах, описываются уравнениями для потенциалов φ_+ , φ_- . В первом варианте рассматриваемой модели решения системы уравнений волнового динамического деформирования для анизотропного материала слоя с толщиной экспоненциально-степенной неоднородностью строятся в виде абсолютно и равномерно сходящихся векторных степенных рядов вида

$$u_{j\alpha}(x_3) = \sum_{s=0}^1 \sum_{m=1}^3 A_{sm} F_{smj}(x_3), \quad \vec{F}_{sm}(x_3) = \{F_{sm1}(x_3), F_{sm2}(x_3), F_{sm3}(x_3)\} = \sum_{n=s}^{\infty} \vec{D}_n^{(sm)} x_3^n,$$

где $\vec{D}_{n+2}^{(s,m)} = -((n+2)(n+1))^{-1} M_C^{-1} [M_{\Omega} \vec{D}_n^{(s,m)} + \lambda p(n+2-p) \vec{D}_{n+2-p}^{(s,m)}]$ ($s = \overline{0,1}; m = \overline{1,3}; n = \overline{s, \infty}$);

$$\vec{D}_n^{(0,m)} = 0 (n < 0); \quad \vec{D}_n^{(1,m)} = 0 (n < 1); \quad \vec{D}_0^{(01)} = \vec{D}_1^{(11)} = (1 \ 0 \ 0)^T, \dots, \quad \vec{D}_0^{(03)} = \vec{D}_1^{(13)} = (0 \ 0 \ 1)^T,$$

$$M_C = \begin{pmatrix} c_{55} & c_{54} & c_{53} \\ c_{45} & c_{44} & c_{43} \\ c_{35} & c_{34} & c_{33} \end{pmatrix}, \quad M_{\Omega} = \begin{pmatrix} \Omega^2 & 0 & 0 \\ 0 & \Omega^2 & 0 \\ 0 & 0 & \Omega^2 \end{pmatrix}.$$

В итоге, для характеристик полей в V_S, V_{F-}, V_{F+} записываются представления

$$G_{ij}(x_3) = \sum_{s=0}^1 \sum_{m=1}^3 A_{sm} F_{smj}(x_3), \quad G_{ijt}(x_3) = (-i\omega) \sum_{s=0}^1 \sum_{m=1}^3 A_{sm} F_{smj}(x_3),$$

$$G_{\sigma j}(x_3) = \sum_{s=0}^1 \sum_{m=1}^3 A_{sm} (c_{6-j,5} F'_{sm1}(x_3) + c_{6-j,4} F'_{sm2}(x_3) + c_{6-j,3} F'_{sm3}(x_3)) \exp(\lambda x_3^2);$$

$$G_P^{(-)}(x_3) = (-i\omega \rho_0^{(-)}) (\varphi_{01}^{(-)} \exp(ik_F^{(-)} x_3) + \varphi_{02}^{(-)} \exp(-ik_F^{(-)} x_3)) = G_{1P}^{(-)}(x_3) + G_{2P}^{(-)}(x_3),$$

$$G_V^{(-)}(x_3) = ik_F^{(-)} (-\varphi_{01}^{(-)} \exp(ik_F^{(-)} x_3) + \varphi_{02}^{(-)} \exp(-ik_F^{(-)} x_3)) = G_{1V}^{(-)}(x_3) + G_{2V}^{(-)}(x_3);$$

$$G_P^{(+)}(x_3) = (-i\omega \rho_0^{(+)}) \varphi_0^{(+)} \exp(ik_F^{(+)} x_3), \quad G_V^{(+)}(x_3) = -ik_F^{(+)} \varphi_0^{(+)} \exp(ik_F^{(+)} x_3),$$

используемые для формулировки граничных условий и получения систем линейных алгебраических уравнений в рассматриваемых ниже моделях экранов с несколькими вариантами структурно-геометрических и физико-механических характеристик.

В частности, в подразделах представляемой главы последовательно реализованы аналитическое и параметрическое численное исследование, а также рассмотрены вопросы структурно-параметрической оптимизации применительно к моделям: однослойного экрана с не имеющими покрытий гранями на основе анализа системы соотношений

$$G_{\sigma_3}(0) - G_{2P}^{(-)}(0) = G_{1P}^{(-)}(0), \quad G_{u_{3t}}(0) - G_{2V}^{(-)}(0) = G_{1V}^{(-)}(0), \quad G_{\sigma_1}(0) = 0, \quad G_{\sigma_2}(0) = 0,$$

$$G_{\sigma_3}(h) - G_P^{(+)}(h) = 0, \quad G_{u_{3t}}(h) - G_V^{(+)}(h) = 0, \quad G_{\sigma_1}(h) = 0, \quad G_{\sigma_2}(h) = 0;$$

однослойного экрана с тонкими нерастяжимыми мембранными покрытиями обеих граней на основе анализа системы соотношений

$$G_{\sigma_3}(0) - G_{2P}^{(-)}(0) = G_{1P}^{(-)}(0), \quad G_{u_{3t}}(0) - G_{2V}^{(-)}(0) = G_{1V}^{(-)}(0), \quad G_{u_1}(0) = 0, \quad G_{u_2}(0) = 0,$$

$$G_{\sigma_3}(h) - G_P^{(+)}(h) = 0, \quad G_{u_{3t}}(h) - G_V^{(+)}(h) = 0, \quad G_{u_1}(h) = 0, \quad G_{u_2}(h) = 0;$$

двухслойного экрана с не имеющими покрытий внешними гранями и идеальным механическим контактом составляющих толщины h_1 и $h_2 - h_1$ на основе анализа системы соотношений

$$G_{\sigma_3}^{(1)}(0) - G_{2P}^{(-)}(0) = G_{1P}^{(-)}(0), \quad G_{u_{3t}}^{(1)}(0) - G_{2V}^{(-)}(0) = G_{1V}^{(-)}(0), \quad G_{\sigma_1}^{(1)}(0) = 0, \quad G_{\sigma_2}^{(1)}(0) = 0,$$

$$G_{u_1}^{(1)}(h_1) = G_{u_1}^{(2)}(h_1), \quad G_{u_2}^{(1)}(h_1) = G_{u_2}^{(2)}(h_1), \quad G_{u_3}^{(1)}(h_1) = G_{u_3}^{(2)}(h_1), \quad G_{\sigma_1}^{(1)}(h_1) = G_{\sigma_1}^{(2)}(h_1), \quad G_{\sigma_2}^{(1)}(h_1) = G_{\sigma_2}^{(2)}(h_1),$$

$$G_{\sigma_3}^{(1)}(h_1) = G_{\sigma_3}^{(2)}(h_1),$$

$$G_{\sigma_3}^{(2)}(h_2) - G_P^{(+)}(h_2) = 0, \quad G_{u_{3t}}^{(2)}(h_2) - G_V^{(+)}(h_2) = 0, \quad G_{\sigma_1}^{(2)}(h_2) = 0, \quad G_{\sigma_2}^{(2)}(h_2) = 0;$$

двухслойного экрана с тонкими нерастяжимыми мембранными покрытиями обеих внешних граней и идеальным механическим контактом составляющих толщины h_1 и $h_2 - h_1$ на основе анализа системы соотношений

$$G_{\sigma_3}^{(1)}(0) - G_{2P}^{(-)}(0) = G_{1P}^{(-)}(0), \quad G_{u_{3t}}^{(1)}(0) - G_{2V}^{(-)}(0) = G_{1V}^{(-)}(0), \quad G_{u_1}^{(1)}(0) = 0, \quad G_{u_2}^{(1)}(0) = 0,$$

$$G_{u_1}^{(1)}(h_1) = G_{u_1}^{(2)}(h_1), \quad G_{u_2}^{(1)}(h_1) = G_{u_2}^{(2)}(h_1), \quad G_{u_3}^{(1)}(h_1) = G_{u_3}^{(2)}(h_1), \quad G_{\sigma_1}^{(1)}(h_1) = G_{\sigma_1}^{(2)}(h_1), \quad G_{\sigma_2}^{(1)}(h_1) = G_{\sigma_2}^{(2)}(h_1),$$

$$G_{\sigma_3}^{(1)}(h_1) = G_{\sigma_3}^{(2)}(h_1),$$

$$G_{\sigma_3}^{(2)}(h_2) - G_p^{(+)}(h_2) = 0, \quad G_{u_{3l}}^{(2)}(h_2) - G_v^{(+)}(h_2) = 0, \quad G_{u_1}^{(2)}(h_2) = 0, \quad G_{u_2}^{(2)}(h_2) = 0.$$

Представлена также методика анализа модели экрана общей многослойной структуры с произвольным числом идеально контактирующих по поверхностям сопряжения слоев, характеризующихся различными наборами физико-механических и геометрических характеристик.

По аналогичной схеме рассмотрены случаи расчета характеристик экранов, в которых распределение свойств анизотропного материала по толщине экранирующего слоя определяется вторым приведенным выше вариантом функциональных зависимостей.

Дано описание ряда установленных в результате исследований эффектов и закономерностей влияния параметров и структурных особенностей рассматриваемых конструктивных элементов на характеристики эффективности функционирования соответствующих технических систем подводного гидроакустического экранирования в различных частотных диапазонах волновых воздействий в контексте целевого назначения данных систем.

Глава 6 диссертационной работы посвящена проблемам моделирования и структурно-параметрической оптимизации характеристик анизотропных цилиндрических элементов систем подводного экранирования, наиболее широкой сферой применения которых является обеспечение оптимальных показателей направленности гидроакустического излучателей и антенн, концентрации энергии излучения в требуемом направлении, минимизации бокового и тыльного излучения и соответствующее повышение эффективности электроакустического преобразования. В контексте данных задач осуществлена разработка усовершенствованной численно-аналитической методики расчета рабочих характеристик протяженного цилиндрического электроакустического пьезокерамического преобразователя концентрического кольцевого сечения с внутренним цилиндрическим и конформным незамкнутым секторно-кольцевым внешним экранами, которые изготовлены из анизотропных функционально-градиентных материалов. Методика основывается на топологической концепции частичных областей, вводимых для реализации ответствующего варианта аналитического интегрирования уравнений волновой динамики в различных частях составного сечения рассматриваемого конструктивного элемента, помещенного в слабосжимаемую жидкую среду. В процессе ее применения последовательно записываются представления в полярных координатах для потенциалов гидроакустических волн в открытых подобластях вне сечения экранированного преобразователя, представления рядами функций полярных координат с неопределенными коэффициентами для характеристик поля электромеханических колебаний в кольцевой области сечения полого пьезокерамического цилиндра, а также представления рядами с неопределенными коэффициентами по соответствующим системам базисных частных решений для уравнений волнового упругого деформирования функционально-градиентных материалов внутреннего и внешнего гидроакустических экранов. При этом интегрирование уравнений волнового деформирования относительно амплитудных функций колебательных перемещений для функционально-градиентных элементов на основе предварительного разделения переменных реализовано применительно к внутреннему экрану в равномерно сходящихся векторно-степенных рядах по радиальной координате, а применительно к внешнему экрану в равномерно сходящихся векторно-степенных рядах по обобщенной кольцевой координате. Структура получаемых представлений вектор-функций волновых упругих перемещений для внутреннего экрана имеет, в частности, вид

$$\vec{u}_l = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{q=1}^2 C_{nq}^{(l)} F_{nq}^{(l)}(r) \exp(i\alpha_{ln}\theta), \quad F_{nq}^{(l)} = \sum_{m=0}^{\infty} B_{qm}^{(l,n)} r^{m+v_q}, \quad \alpha_{ln} = n\pi \quad (n = \overline{-\infty, \infty})$$

и содержит векторные коэффициенты $B_{qm}^{(l,n)}$, определяемые из систем рекуррентных соотношений $B_{q,m}^{(l,n)} = -((v_q + m)(v_q + m - 1)M_{1ln} + (v_q + m)M_{2ln} + M_{3ln})^{-1} \cdot (((v_q + m - 1)M_{4ln} + M_{5ln})B_{q,m-1}^{(l,n)} + M_{\Omega} B_{q,m-2}^{(l,n)})$ ($m = \overline{2, \infty}$; $q = 1, 2$); $B_{q,1}^{(l,n)} = -((v_q + 1)v_q M_{1ln} + (v_q + 1)M_{2ln} +$

$+ M_{3ln})^{-1} (v_q M_{4ln} + M_{5ln}) B_{q,0}^{(l,n)}$. Здесь в v_q – корни биквадратного полиномиального уравнения $\det M_{ln} = 0$, $M_{ln} = v_q(v_q - 1)M_{1ln} + v_q M_{2ln} + M_{3ln}$ с положительно определенными реальными частями; $B_{q,0}^{(l,n)}$ – соответствующие значениям v_q и определенные с точностью до произвольного постоянного множителя нетривиальные решения систем однородных алгебраических уравнений $M_{ln} B_{q,0}^{(l,n)} = 0$; M_{pln} – матрицы со структурой вида

$$M_{1ln} = \begin{pmatrix} \lambda_{lrr} & 0 \\ 0 & \mu_{lr\theta} \end{pmatrix}, M_{2ln} = \begin{pmatrix} \lambda_{lrr} & -(\lambda_{lr\theta} + \mu_{lr\theta})\alpha_{ln} \\ (\lambda_{lr\theta} + \mu_{lr\theta})\alpha_{ln} & \mu_{lr\theta} \end{pmatrix}, \dots, M_{l\Omega} = \begin{pmatrix} \Omega_l^2 & 0 \\ 0 & \Omega_l^2 \end{pmatrix}.$$

Заключительной фазой реализации описываемой методики является сведение функциональных уравнений, порождаемых краевыми условиями граничной задачи в области сечения рассматриваемой конструкции, к бесконечной системе линейных алгебраических уравнений для коэффициентов введенных разложений и анализ данной системы в редуцированном виде. Разработанный алгоритм, дополненный предложенным в главе критериальным соотношением нелинейной минимизации, является инструментом оптимизационного расчета характеристик технических систем анизотропных функционально-градиентных элементов экранирования для активных и пассивных цилиндрических гидроакустических антенн ПТС по критериям обеспечения характеристик направленности и снижения уровней искажающего сигнального шума.

Глава 7 работы посвящена проблемам исследования и оптимизации характеристик плоских трансверсально-изотропных перфорированных гидроакустических экранов из однородных либо функционально-градиентных материалов с герметизированными поперечными цилиндрическими полостями в рамках использования прикладных инженерных моделей.

Применительно к конструкциям данного типа осуществлен анализ закономерностей распространения упругих волн по толщине трансверсально-изотропного гидроакустического экрана с двоякопериодической гексагональной решеткой плотно упакованных одинаковых поперечных круговых цилиндрических полостей радиуса R_1 , который базируется на прикладной гипотезе о структурном разбиении экранирующего многосвязного слоя на уединенные размещенные в жестких обоймах осесимметрично деформирующиеся экспоненциально-неоднородные вдоль осевой координаты анизотропные цилиндрические псевдотрубки, на наружных поверхностях которых радиуса R_2 отсутствуют нормальные упругие перемещения и касательные напряжения. В процессе реализованных исследований разработана методика аналитического интегрирования систем уравнений распространения осесимметричных упругих волн вдоль псевдотрубок в равномерно сходящихся векторных степенных рядах радиальной координаты, и в форме равенства нулю функционального определителя четвертого порядка получено основное дисперсионное соотношения для волн исследуемого типа. Представлен алгоритм исследования построенного дисперсионного уравнения с целью определения фазовых скоростей распространяющихся волн и расчета импеданса рассматриваемого экрана. Описана схема варьирования переменных управления в анализируемой модели, к которым относятся экзогенные параметры упругих постоянных c_{ij} , плотности ρ , показателя экспоненциальной функционально-градиентной неоднородности λ и коэффициента перфорации $\tau = R_1 / R_2$. Представлен алгоритм оптимизации параметров экранирующего элемента рассматриваемого типа с достижением показателей, которые не могут быть получены при использовании в конструкциях рассматриваемых покрытий однородных изотропных материалов.

Далее в рассматриваемой главе работы осуществлено исследование прикладных инженерных моделей расчета импеданса плоских перфорированных гидроакустических экранов толщины h из однородных эластичных трансверсально-изотропных материалов, на плоских гранях которых размещены проскальзывающие либо жестко сцепленные с материалом экрана герметизирующие металлические пластины. В диапазоне относительно

длинноволновых гидроакустических воздействий для оценки величины импеданса экрана с проскальзывающим герметизирующим покрытием воздухосодержащих полостей получено соотношение $Z^* = [\rho(1-\tau^2)^2(c_{33} - 2c_{13}\chi)]^{1/2}$, $\chi = c_{13}\tau^2[c_{11}(\tau^2 + 1) + c_{12}(\tau^2 - 1)]^{-1}$, а для импеданса экрана с жестко сцепленным покрытием – соотношение $Z^{**} = [\rho(1-\tau^2)^2(c_{33} - 2c_{13}\chi)Y(\tau, h, \tilde{c}_{ij}) / (Y^{(\infty)}(\tau, \tilde{c}_{ij}))]^{1/2}$, $Y(\tau, h, \tilde{c}_{ij}) =$
 $= \pi\{(8/(15\tau^2))(1-\tau^2)(c_{11} - c_{12} + (c_{11} + 2c_{33} - 4c_{13})\tau^2) - (8/3)h^{-2}\tilde{c}_{44}(3 + \tau^4 - 4\tau^2 + 4\ln\tau)\}$,
 $Y^{(\infty)}(\tau, \tilde{c}_{ij}) = \pi(8/(15\tau^2))(1-\tau^2)(c_{11} - c_{12} + (c_{11} + 2c_{33} - 4c_{13})\tau^2)$.

С использованием полученных представлений реализован сопоставительный численный анализ импедансов анизотропных многосвязных перфорированных гидроакустических экранов из стеклопластика и углепластика с различными способами герметизации воздухозаполненных цилиндрических полостей и импедансов экранов данного типа, для которых соответствующие композиционные материалы рассматривались в изотропном приближении. Установлено, что учет фактора поперечной анизотропии влечет за собой существенные коррекции в оценках величин импедансов, причем наблюдаемые расхождения, заключающиеся в снижении расчетного значения импеданса в рамках модели учета фактора анизотропии, для рассмотренных материалов возрастают по мере уменьшения коэффициента перфорации τ и достигают величин порядка 30 – 35 % для экранов с герметизацией проскальзывающими покрытиями и величин порядка 50 – 75 % для экранов с герметизацией жестко сцепленными покрытиями. Наряду с проведенным параметрическим анализом применительно к рассмотренным моделям описаны возможные схемы варьирования семи экзогенных параметров \tilde{c}_{ij} , ρ , h , τ для оптимизации характеристик экранов с достижением показателей, которые не могут обеспечиваться при использовании в конструкциях покрытий данного типа изотропных конструкционных материалов.

Восьмая глава диссертационной работы посвящена проблемам моделирования и оптимизации конструкций плоских многосвязных перфорированных трансверсально-изотропных предварительно напряженных гидроакустических экранов с массивными тонкими жесткими нерастяжимыми в плоскости покрытиями в геометрически точной пространственной постановке с применением метода рядов по базисным системам динамических однородных решений. Моделируемый экранирующий элемент рассматривается как граничащий по граням с полубесконечными областями идеальной слабосжимаемой жидкости трансверсально-изотропный линейно-вязкоупругий слой с двоякопериодической гексагональной решеткой одинаковых поперечных круговых цилиндрических полостей-отверстий, занимающий в координатном пространстве область

$$V = \{(x_1, x_2) \in R^2 / \bigcup_{q,m=-\infty}^{\infty} S_{qm}, x_3 \in [-h, h]\}, \text{ где } S_{qm} - \text{области поперечных сечений}$$

перфорирующих отверстий. Полости являются незаполненными либо содержат одинаковые по физико-механическим свойствам эластичные линейно-вязкоупругие цилиндрические включения из однородных трансверсально-изотропных или цилиндрически-ортотропных функционально-градиентных материалов.

Первый этап разрабатываемой двухэтапной методики связан с учетом действия на экранирующий слой двухстороннего высокоинтенсивного гидростатического давления и возникновения в нем больших предварительных деформаций и начальных напряжений. Ввиду равномерного распределения сжимающих слой гидростатических усилий принимается гипотеза об описании этой составляющей напряженно-деформированного состояния в рамках линеаризованной теории больших однородных начальных деформаций соотношениями $u_j^0 = \delta_{ij}(\lambda_i - 1)x_i$, $\sigma_{ij}^{*0} = \delta_{ij}P_i^*$, $\lambda_1 = \lambda_2 \neq \lambda_3$, $\lambda_j = const$, $\sigma_{ij}^{*0} = const$ с компонентами вектора начальных перемещений и тензора начальных напряжений u_j^0 , σ_{ij}^{*0} и

константами λ_j , обусловленными выбором формы упругого потенциала для эластичного сжимаемого материала экрана.

На втором этапе реализации предлагаемой методики исследуется линеаризированная модель учета обусловленных падением гидроакустических волн малых возмущающих упругих колебаний с циклической частотой ω для статически предварительно-напряженных материалов слоя (L) и включений (I). Комплексные амплитудные характеристики волнового деформирования выражаются через обобщенные потенциалы $\phi(x_1, x_2, x_3)$, $\chi(x_1, x_2, x_3)$, определяемые из уравнений вида

$$\begin{aligned} (\partial_3^2 + \beta_3 \beta_1^{-1} D^2 + \rho \omega^2 \lambda_1^{-2} \beta_1^{-1}) \phi(x_1, x_2, x_3) &= 0, \\ (\partial_3^4 + (\kappa_1 D^2 + \kappa_2) \partial_3^2 + (\kappa_3 D^4 + \kappa_4 D^2 + \kappa_5)) \chi(x_1, x_2, x_3) &= 0, \end{aligned}$$

и удовлетворяют краевым условиям для волновых перемещений и возмущающих механических напряжений $u_\alpha^{(Q)}$, $P_{\alpha\beta}^{(Q)}$ ($\alpha, \beta = \overline{1,3}$; $\alpha, \beta = r, \theta, z$; $Q = L, I$) в иницируемом гидроакустическими воздействиями поле

$$\begin{aligned} [u_1]_{x_3=\mp h} &= [u_2]_{x_3=\mp h} = 0, [P_{zz}]_{x_3=\mp h} = P^{(\mp)} + P_\omega^{(\mp)}, \\ [P_{rr}^{(L)}]_{r_{qm}=R, \theta_{qm} \in [0, 2\pi], z \in [-h, h]} &= [P_{rr}^{(I)}]_{r_{qm}=R, \theta_{qm} \in [0, 2\pi], z \in [-h, h]}, \\ [P_{r\theta}^{(L)}]_{r_{qm}=R, \theta_{qm} \in [0, 2\pi], z \in [-h, h]} &= [P_{r\theta}^{(I)}]_{r_{qm}=R, \theta_{qm} \in [0, 2\pi], z \in [-h, h]}, \\ [P_{rz}^{(L)}]_{r_{qm}=R, \theta_{qm} \in [0, 2\pi], z \in [-h, h]} &= [P_{rz}^{(I)}]_{r_{qm}=R, \theta_{qm} \in [0, 2\pi], z \in [-h, h]}, \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} P^{(-)} &= (-i\omega\rho^{(-)})(\varphi_{01}^{(-)} + \varphi_{02}^{(-)}), P^{(+)} = (-i\omega\rho^{(+)})\varphi_0^{(+)}, P_\omega^{(\mp)} = -m^* \omega^2 [u_3]_{x_3=\mp h}, \\ P_{rr} &= [\lambda_1^2 (a_{11} + \sigma_{11}^* \lambda_1^{-2}) \partial_r u_r + \lambda_1^2 a_{12} (r^{-1} u_r + r^{-1} \partial_\theta u_\theta) + \lambda_1 \lambda_3 a_{13} \partial_z u_z], \dots, \\ P_{zz} &= a_{13} \lambda_1 \lambda_3 (\partial_1 u_1 + \partial_2 u_2) + (a_{33} \lambda_3^2 + \sigma_{33}^*) \partial_3 u_3. \end{aligned}$$

Решение данной краевой задачи включает три составляющих, первой из которых является зависящее только от x_3 частное решение уравнения для потенциала χ , удовлетворяющее неоднородному краевому условию взаимодействия экрана с нормально падающей гидроакустической волной. Второй составляющей является зависящее от x_3 частное решение неоднородной краевой задачи для потенциала χ , описывающее равномерно распределенное нормальное нагружение граней слоя силами инерции при колебаниях присоединенных массивных недеформируемых покрытий. Третья составляющая является решением граничной задачи со смешанными однородными краевыми условиями на плоских гранях слоя и включений, имеющих свободно перемещающиеся вдоль x_3 недеформируемые в своей плоскости безинерционные покрытия. Данное решение в сумме с решениями первых двух указанных типов подчиняется граничным условиям на свободных цилиндрических поверхностях перфорирующих полостей, либо на цилиндрических поверхностях контакта материалов слоя и включений. Для многосвязной области экранирующего слоя решение задачи третьего типа строится в форме суперпозиции разложений по базисным однородным решениям в локальных координатных системах, связываемых с неоднородностями в виде полостей

$$\begin{aligned} \chi &= \sum_{(q,m)} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{d=1}^2 (\chi_{cqm}^{(nd)}(r_{qm}, \theta_{qm}) \cos \gamma_{cn} x_3 + \chi_{sqm}^{(nd)}(r_{qm}, \theta_{qm}) \sin \gamma_{sn} x_3), \\ \phi &= \sum_{(q,m)} \sum_{n=1}^{\infty} (\phi_{cqm}^{(n)}(r_{qm}, \theta_{qm}) \cos \gamma_{cn} x_3 + \phi_{sqm}^{(n)}(r_{qm}, \theta_{qm}) \sin \gamma_{sn} x_3), \end{aligned}$$

где $\chi_{cqm}^{(nd)}(r_{qm}, \theta_{qm})$, $\chi_{sqm}^{(nd)}(r_{qm}, \theta_{qm})$, $\phi_{cqm}^{(n)}(r_{qm}, \theta_{qm})$, $\phi_{sqm}^{(n)}(r_{qm}, \theta_{qm})$ – метагармонические функции, с неопределенными коэффициентами $A_{cqm}^{(nd)}$, $A_{sqm}^{(nd)}$, $B_{cqm}^{(n)}$, $B_{sqm}^{(n)}$, имеющие представления

$$\chi_{cqm}^{(nd)}(r_{qm}, \theta_{qm}) = \sum_{(p)} A_{cqm}^{(nd)} H_p^{(1)}(\xi_{cnd} r_{qm}) \exp(ip\theta_{qm}), \dots, \phi_{cqm}^{(n)}(r_{qm}, \theta_{qm}) = \sum_{(p)} B_{cqm}^{(n)} H_p^{(1)}(\xi_{sn} r_{qm}) \exp(ip\theta_{qm})$$

Для эластичных анизотропных включений соответствующие потенциалы имеют вид

$$\tilde{\chi}_{cqm}^{(nd)}(r_{qm}, \theta_{qm}) = \sum_{(p)} A_{cqm}^{(nd)} J_p(\xi_{cnd} r_{qm}) \exp(ip\theta_{qm}), \dots, \tilde{\phi}_{cqm}^{(n)}(r_{qm}, \theta_{qm}) = \sum_{(p)} B_{cqm}^{(n)} J_p(\xi_{sn} r_{qm}) \exp(ip\theta_{qm}).$$

Заключительная аналитическая фаза реализации методики заключается в использовании для рассматриваемых двоякопериодических структур теории Флоке, применении теорем сложения цилиндрических функций и метода ортогональных рядов для алгебраизации функциональных краевых условий на граничной поверхности центральной перфорирующей полости. В результате этого исследуемая задача сводится к бесконечным системам линейных алгебраических уравнений относительно коэффициентов в представлениях характеристик возмущенного динамического напряженно-деформированного состояния слоя рядами по базисным однородным решениям, а также относительно амплитудных характеристик потенциалов отраженных и генерируемых в заэкранном пространстве гидроакустических волн. Полученные системы подлежат численному исследованию на основе предварительной редукции. Аналогичная методика анализа модели данного типа построена применительно к случаю цилиндрически-ортотропных функционально-градиентных включений.

Разработана также методическая схема использования построенных решений для структурно-параметрической оптимизации характеристик конструкционных элементов технических систем подводного экранирования рассматриваемого типа.

Глава 9 диссертации посвящена разработке и апробации теоретических алгоритмов анализа факторов неопределенности в моделях нормального либо наклонного падения волн гидроакустического давления на контактирующие по граням с массивами идеальной слабосжимаемой жидкости плоские экраны. В основу разрабатываемых методик положен прием использования результатов исследования детерминистических версий соответствующих моделей с последующей заменой четких параметров в расчетных аналитических соотношениях для анализируемых характеристик эффективности экранирования нечетко-интервальными аргументами в рамках эвристического принципа расширения областей определения классических функциональных отображений.

В первых двух подразделах главы рассматриваются модели нормального падения волн давления на экраны из вязкоупругого однородного и функционально-градиентного трансверсально-изотропного материала. Применительно к однородному трансверсально-изотропному экрану для получения расчетных аналитических соотношений, определяющих показатели эффективности экранирования, осуществляется анализ соответствующего варианта четкой детерминистической модели, в результате которого для подлежащих исследованию параметрических зависимостей записываются представления, содержащие амплитудные характеристики падающей, отраженной и генерируемой за экраном гидроакустических волн

$$\begin{aligned} g_1(\kappa^{(\pm)}, \rho_0^{(\pm)}, c_{33}^*, c_{33}^{**}, \rho, h, \omega) &= \left| \tilde{P}_2^{(-)} / \tilde{P}_1^{(-)} \right| = \left| \varphi_{02}^{(-)} / \varphi_{01}^{(-)} \right|, \\ g_2(\kappa^{(\pm)}, \rho_0^{(\pm)}, c_{33}^*, c_{33}^{**}, \rho, h, \omega) &= \left| \tilde{P}^{(+)} / \tilde{P}_1^{(-)} \right| = \left| \varphi_0^{(+)} / \varphi_{01}^{(-)} \right|, \\ \varphi_{02}^{(-)} &= (-\zeta_1(\Delta_{22}(\Delta_{34}\Delta_{43} - \Delta_{33}\Delta_{44}) + \Delta_{23}(\Delta_{32}\Delta_{44} - \Delta_{34}\Delta_{42})) - \\ &- \zeta_2(\Delta_{13}(\Delta_{34}\Delta_{42} - \Delta_{32}\Delta_{44}) + \Delta_{12}(\Delta_{33}\Delta_{44} - \Delta_{34}\Delta_{43})))\mathcal{G}^{-1}, \quad \varphi_0^{(+)} = -(\zeta_2\Delta_{11} - \zeta_1\Delta_{21})(\Delta_{32}\Delta_{43} - \Delta_{33}\Delta_{42})\mathcal{G}^{-1}, \\ \mathcal{G} &= -\Delta_{13}\Delta_{21}\Delta_{34}\Delta_{42} + \Delta_{11}\Delta_{23}\Delta_{34}\Delta_{42} + \Delta_{12}\Delta_{21}\Delta_{34}\Delta_{43} - \Delta_{11}\Delta_{22}\Delta_{34}\Delta_{43} - \Delta_{11}\Delta_{23}\Delta_{32}\Delta_{44} + \\ &+ \Delta_{13}\Delta_{21}\Delta_{32}\Delta_{44} - \Delta_{12}\Delta_{21}\Delta_{33}\Delta_{44} + \Delta_{11}\Delta_{22}\Delta_{33}\Delta_{44}; \quad \Delta_{11} = -i\omega\rho_0^{(-)}, \quad \Delta_{12} = (c_{33}/\omega)(i\alpha^2), \dots, \\ \Delta_{43} &= (-i\alpha) \cdot \exp(i\alpha h), \quad \Delta_{44} = ik_F^{(+)} \cdot \exp(ik_F^{(+)} h), \quad \zeta_1 = i\omega\rho_0^{(-)}\varphi_{01}^{(-)}, \quad \zeta_2 = -ik_F^{(-)}\varphi_{01}^{(-)}. \end{aligned}$$

При исследовании вводится предположение об эффективном описании неконтрастных значений параметров $\kappa^{(\pm)}, \rho_0^{(\pm)}, c_{33}^*, c_{33}^{**}, \rho, h, \omega$ трапецидальными нормальными нечеткими интервалами $\tilde{\kappa}^{(\pm)}, \tilde{\rho}_0^{(\pm)}, \tilde{c}_{33}^*, \tilde{c}_{33}^{**}, \tilde{\rho}, \tilde{h}, \tilde{\omega}$, соответственно характеризуемыми кортежами реперных точек $\tilde{\kappa}^{(\pm)} : (\kappa_{\pm}^{(1)}, \kappa_{\pm}^{(2)}, \kappa_{\pm}^{(3)}, \kappa_{\pm}^{(4)})$, $\tilde{\rho}_0^{(\pm)} : (\rho_{0\pm}^{(1)}, \rho_{0\pm}^{(2)}, \rho_{0\pm}^{(3)}, \rho_{0\pm}^{(4)})$, $\tilde{c}_{33}^* : (c_{33}^{(1)}, c_{33}^{(2)}, c_{33}^{(3)}, c_{33}^{(4)})$, $\tilde{c}_{33}^{**} : (s_{33}^{(1)}, s_{33}^{(2)}, s_{33}^{(3)}, s_{33}^{(4)})$, $\tilde{\rho} : (\rho_{\pm}^{(1)}, \rho_{\pm}^{(2)}, \rho_{\pm}^{(3)}, \rho_{\pm}^{(4)})$, $\tilde{h} : (h^{(1)}, h^{(2)}, h^{(3)}, h^{(4)})$, $\tilde{\omega} : (\omega^{(1)}, \omega^{(2)}, \omega^{(3)}, \omega^{(4)})$ и представляемыми суперпозициями множеств α -срезов

$$\tilde{\kappa}^{(\pm)} = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} (\underline{\kappa}_{\pm\alpha}, \overline{\kappa}_{\pm\alpha}) = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} ((1-\alpha)\kappa_{\pm}^{(1)} + \alpha\kappa_{\pm}^{(2)}, \alpha\kappa_{\pm}^{(3)} + (1-\alpha)\kappa_{\pm}^{(4)}), \dots,$$

$$\tilde{\omega} = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} (\underline{\omega}_{\alpha}, \overline{\omega}_{\alpha}) = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} ((1-\alpha)\omega^{(1)} + \alpha\omega^{(2)}, \alpha\omega^{(3)} + (1-\alpha)\omega^{(4)}).$$

Нечеткие оценки для характеристик экранирования в рассматриваемом случае получены в виде $\tilde{g}_j = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} (\underline{g}_{j\alpha}, \overline{g}_{j\alpha})$, где

$$\underline{g}_{j\alpha} = \inf_{\substack{\kappa^{(\pm)} \in (\underline{\kappa}_{\pm\alpha}, \overline{\kappa}_{\pm\alpha}) \\ \rho_0^{(\pm)} \in (\underline{\rho}_{\pm\alpha}, \overline{\rho}_{\pm\alpha}) \\ c_{33}^* \in (\underline{c}_{33\alpha}, \overline{c}_{33\alpha}) \\ c_{33}^{**} \in (\underline{s}_{33\alpha}, \overline{s}_{33\alpha}) \\ \rho \in (\underline{\rho}_{\alpha}, \overline{\rho}_{\alpha}) \\ h \in (\underline{h}_{\alpha}, \overline{h}_{\alpha}) \\ \omega \in (\underline{\omega}_{\alpha}, \overline{\omega}_{\alpha})}} g_j(\kappa^{(\pm)}, \rho_0^{(\pm)}, c_{33}^*, c_{33}^{**}, \rho, h, \omega), \quad \overline{g}_{j\alpha} = \sup_{\substack{\kappa^{(\pm)} \in (\underline{\kappa}_{\pm\alpha}, \overline{\kappa}_{\pm\alpha}) \\ \rho_0^{(\pm)} \in (\underline{\rho}_{\pm\alpha}, \overline{\rho}_{\pm\alpha}) \\ c_{33}^* \in (\underline{c}_{33\alpha}, \overline{c}_{33\alpha}) \\ c_{33}^{**} \in (\underline{s}_{33\alpha}, \overline{s}_{33\alpha}) \\ \rho \in (\underline{\rho}_{\alpha}, \overline{\rho}_{\alpha}) \\ h \in (\underline{h}_{\alpha}, \overline{h}_{\alpha}) \\ \omega \in (\underline{\omega}_{\alpha}, \overline{\omega}_{\alpha})}} g_j(\kappa^{(\pm)}, \rho_0^{(\pm)}, c_{33}^*, c_{33}^{**}, \rho, h, \omega).$$

Аналогичная в концептуальном плане методика получения нечетких оценок \tilde{g}_j для характеристик эффективности экранирования разработана далее для трансверсально-изотропных функционально-градиентных экранов. В этом случае эвристический принцип расширения применяется к расчетным аналитическим соотношениям, полученным в третьей главе работы и содержащим в сравнении с вышерассмотренной моделью экзогенный параметр экспоненциальной неоднородности физико-механических характеристик λ материала экрана. В рамках последующего использования α -уровневой формы эвристического принципа расширения параметры указанных расчетных соотношений заменяются трапецидальными нечеткими интервалами $\tilde{\kappa}^{(\pm)}, \tilde{\rho}_0^{(\pm)}, \tilde{c}_{33}^*, \tilde{c}_{33}^{**}, \tilde{\rho}, \tilde{\lambda}, \tilde{h}, \tilde{\omega}$, представляемыми в виде суперпозиций множеств α -срезов, и далее реализуется вычислительный алгоритм определения \tilde{g}_j с заданием соответствующих схем варьирования значений $\kappa^{(\pm)}, \rho_0^{(\pm)}, c_{33}^*, c_{33}^{**}, \rho, \lambda, h, \omega$ на каждом из α -срезов. Так, в предположении о существенной неконтрастности нормированных параметров $c_{33}^* \cdot 10^{-10} [Pa]$, $h \cdot 10^{-2} [m]$, λ рассматриваемой модели, интерпретируемых как нечетко интервальные величины с изображенными на рис. 3 функциями принадлежности, получаемые нечеткие оценки \tilde{g}_j характеризуются функциями принадлежности, приведенными на рис. 4.

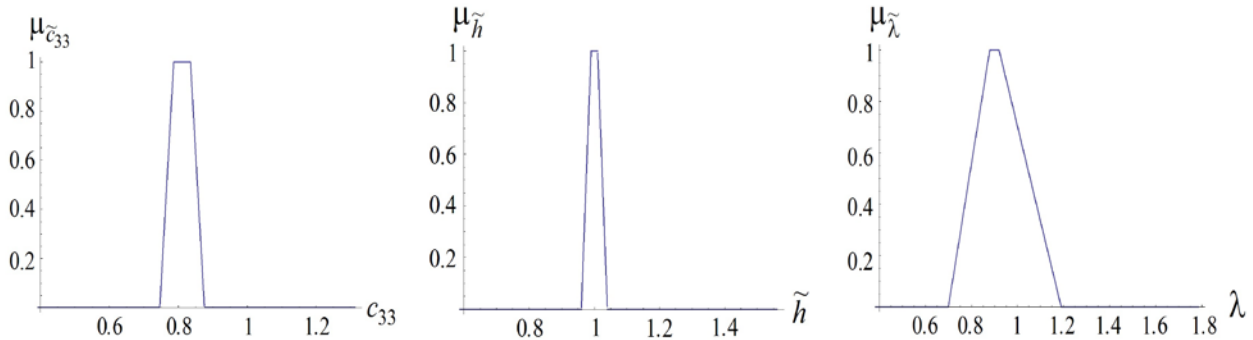


Рис. 3. Функции принадлежности для нечетко-множественных характеристик \tilde{c}_{33}^* , \tilde{h} , $\tilde{\lambda}$.

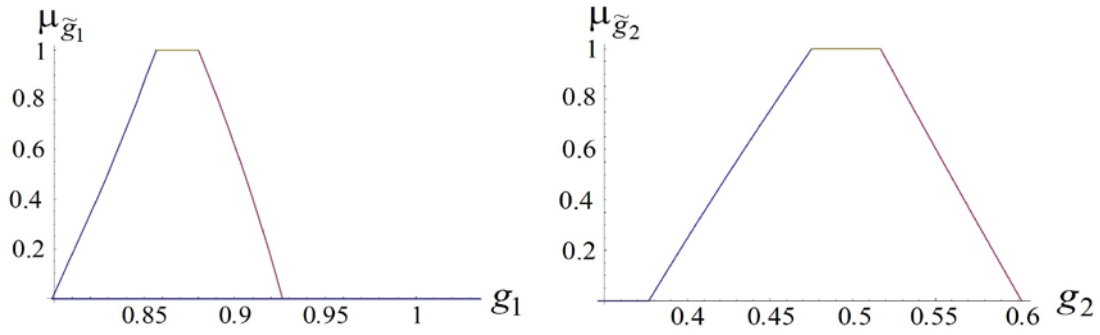


Рис. 4. Функции принадлежности для нечетко-множественных характеристик \tilde{g}_j .

Наличие таких оценок позволяет повысить достоверность расчетных результатов предпроектного моделирования конструктивных элементов систем гидроакустического экранирования из поперечно-анизотропных функционально-градиентных композиционных материалов.

Далее в рассматриваемой главе разработана и исследована нечеткая модель отражения и преломления гидроакустических волн при наклонном падении под углом ϕ_0 на расположенный между полупространствами идеальной слабосжимаемой жидкости однородный изотропный плоский гидроакустический экран. Для модели этого типа в процессе исследования осуществлен вывод детерминистических соотношений $\varphi_{02}^{(-)} = F_1(\omega, \rho_0^{(-)}, \rho_0^{(+)}, \kappa^{(-)}, \kappa^{(+)}, \rho, \lambda, \mu, h, \phi_0)$, $\varphi_0^{(+)} = F_6(\omega, \rho_0^{(-)}, \rho_0^{(+)}, \kappa^{(-)}, \kappa^{(+)}, \rho, \lambda, \mu, h, \phi_0)$, описывающих показатели интенсивности отраженной и формирующейся в жидкости за экраном гидроакустических волн, выражаемые через решения системы линейных алгебраических уравнений шестого порядка с параметрической функциональной матрицей. Далее к полученным соотношениям в предположении о нечетко-интервальном задании неконтрастных экзогенных параметров применяется эвристический принцип расширения, и искомые нечетко-множественные оценки записываются в форме разложений по множествам α - уровня. В рассматриваемой модели реализованы численные исследования, связанные с оценкам нечеткости угла отражения и угла преломления в пространство за экраном для вторичных гидроакустических волн.

В заключительном подразделе девятой главы представлены результаты разработки методики нечеткого оценивания эндогенных характеристик для модели плоских функционально-градиентных гидроакустических экранов с триклинной анизотропией. Предлагаемая методика, как и в предшествующих подразделах, базируется на применении модифицированного эвристического принципа обобщения к представлениям оцениваемых эндогенных параметров, полученным в рамках анализа четкой детерминистической версии рассматриваемой модели в главе 4 работы. На основе введения нечетко-интервальных представлений экзогенных параметров модели $\tilde{c}_{ij}^{(0)}$, $\tilde{\psi}_{ij}$, $\tilde{\lambda}$, $\tilde{\rho}$, $\tilde{\kappa}^{(\pm)}$, $\tilde{\rho}_0^{(\pm)}$ искомые оценки характеристик эффективности экранирования получены в форме $\tilde{\varphi}_{02}^{(-)} = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} (\underline{P}_{02\alpha}, \overline{P}_{02\alpha})$,

$\tilde{\varphi}_0^{(+)} = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} (\underline{P}_{0\alpha}, \overline{P}_{0\alpha})$, где в данном случае

$$\underline{P}_{02\alpha} = \{ \inf_{\substack{c_{ij}^{(0)} \in (\underline{c}_{ij\alpha}, \overline{c}_{ij\alpha}) \\ \psi_{ij} \in (\underline{\psi}_{ij\alpha}, \overline{\psi}_{ij\alpha}) \\ \lambda \in (\underline{\lambda}_\alpha, \overline{\lambda}_\alpha) \\ \rho \in (\underline{\rho}_\alpha, \overline{\rho}_\alpha) \\ \kappa^{(\pm)} \in (\underline{\kappa}_{\pm\alpha}, \overline{\kappa}_{\pm\alpha}) \\ \rho_0^{(\pm)} \in (\underline{\rho}_{\pm\alpha}, \overline{\rho}_{\pm\alpha})}} \Delta_o^{(\lambda)}(c_{ij}^{(0)}, \psi_{ij}, \lambda, \rho, \kappa^{(\pm)}, \rho_0^{(\pm)}, \omega, h) \cdot \varphi_{01}^{(-)}, \dots, \dots \}$$

$$\bar{P}_{0\alpha} = \{ \sup_{\substack{c_{ij}^{(0)} \in (\underline{c}_{ij\alpha}, \bar{c}_{ij\alpha}) \\ \psi_{ij} \in (\underline{\psi}_{ij\alpha}, \bar{\psi}_{ij\alpha}) \\ \lambda \in (\underline{\lambda}_\alpha, \bar{\lambda}_\alpha) \\ \rho \in (\underline{\rho}_\alpha, \bar{\rho}_\alpha) \\ \kappa^{(\pm)} \in (\underline{\kappa}_{\pm\alpha}, \bar{\kappa}_{\pm\alpha}) \\ \rho_0^{(\pm)} \in (\underline{\rho}_{\pm\alpha}, \bar{\rho}_{\pm\alpha})}} \Delta_p^{(\lambda)}(c_{ij}^{(0)}, \psi_{ij}, \lambda, \rho, \kappa^{(\pm)}, \rho_0^{(\pm)}, \omega, h) \} \varphi_{01}^{(-)}.$$

В главе 10 диссертации представлена разработка нечетко-множественной прикладной численно-аналитической методики учета факторов неопределенности в прикладных моделях микронеоднородных эластичных материалов и перфорированных элементов технических систем подводного гидроакустического экранирования. Изложены результаты исследования ряда моделей указанного типа с неконтрастными, имеющими разбросы экспериментальных и экспертно оцениваемых значений экзогенными физико-механическими и структурно-геометрическими параметрами. К числу рассмотренных принадлежат прикладные модели определения нечетких усредненных эффективных величин для модулей Юнга, для объемных модулей упругости и для скоростей волн деформаций в микронеоднородных эластичных материалах типа пористой резины (эластичной среды с конгломератом распределенных внутренних сферических полостей), а также ячеистого полимер-пенопласта. В анализируемых моделях учитывается фактор действия внешних высокоинтенсивных сжимающих гидростатических усилий, вызывающих трансформацию сферической формы пор в эллипсоидальную. Разрабатываемый подход базируется на приеме замены четких параметров в прикладных расчетных аналитических соотношениях для анализируемых характеристик соответствующими нечетко-интервальными аргументами в рамках применения модифицированного эвристического принципа расширения областей определения классических детерминированных функциональных отображений на нечетко-множественные. Представлены результаты применения данной методики к расчетным соотношениям для объемного модуля упругости $K = K(E, \nu, \varepsilon) = (2/3)E(1 - \varepsilon)(\varepsilon(1 + \nu) + 2(1 - 2\nu))^{-1}$ полимерной эластичной среды с конгломератом цилиндрических полостей – пор, для продольного модуля упругости $D = D(E, \nu, \varepsilon) = 2E(1 - \varepsilon)(1 - \nu)((\varepsilon(1 + \nu) + 2(1 - 2\nu))(1 + \nu))^{-1}$, для объемного модуля упругости $K_p = K_p(E, \nu, \varepsilon, \delta) = (\varepsilon_0 / (\varepsilon_0 - \delta)) (2/3)E(1 - \varepsilon)(\varepsilon(1 + \nu) + 2(1 - 2\nu))^{-1}$ подверженного давлению интенсивности P высокоэластичного резиноподобного материала с внутренними микроростями, имеющими в недеформированном состоянии при отсутствии внешнего давления сферическую форму и созданными при помощи газосодержащих микросфер, а также для скорости c_l объемных упругих волн продольного типа $c_l(E, \nu, \varepsilon, \delta, \rho_0, \delta_f) = 2c_l((1 - \nu)((1 + \nu)(\varepsilon_p + 2(1 - 2\nu)/(1 + \nu)))^{-1})^{1/2}$ в высокоэластичных микронеоднородных пористых материалах при различных типах и показателях интенсивности внешнего давления P , в том числе вызывающих формоизменение внутренних сферических полостей. Для экзогенных параметров данных расчетных соотношений вводятся описания нормальными трапецеидальными нечеткими интервалами с кортежами реперных точек $\tilde{\nu} : (\nu^{(1)}, \nu^{(2)}, \nu^{(3)}, \nu^{(4)})$, $\tilde{\varepsilon} : (\varepsilon^{(1)}, \varepsilon^{(2)}, \varepsilon^{(3)}, \varepsilon^{(4)})$, $\tilde{\delta} : (\delta^{(1)}, \delta^{(2)}, \delta^{(3)}, \delta^{(4)})$, представляемыми разложениями по множествам α - срезов

$$\tilde{\nu} = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} (\underline{\nu}_\alpha, \bar{\nu}_\alpha) = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} ((1 - \alpha)\nu^{(1)} + \alpha\nu^{(2)}, \alpha\nu^{(3)} + (1 - \alpha)\nu^{(4)}),$$

$$\tilde{\delta} = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} (\underline{\delta}_\alpha, \bar{\delta}_\alpha) = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} ((1 - \alpha)\delta^{(1)} + \alpha\delta^{(2)}, \alpha\delta^{(3)} + (1 - \alpha)\delta^{(4)}).$$

Искомые нечеткие оценки также формируются в виде суперпозиций по множествам α - уровня

$$\tilde{K} = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} (\underline{K}_\alpha, \overline{K}_\alpha), \quad \tilde{D} = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} (\underline{D}_\alpha, \overline{D}_\alpha), \quad \tilde{K}_p = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} (\underline{K}_{p\alpha}, \overline{K}_{p\alpha}), \quad \tilde{c}_l = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} (\underline{c}_{l\alpha}, \overline{c}_{l\alpha}),$$

для граничных значений которых в соответствии с полученными в областях допустимых значений $0 < \nu < 0.5$, $E > 0$, $0 < \varepsilon < 1$ оценками

$$\partial K(E, \nu, \varepsilon) / \partial E \geq 0, \quad \partial K(E, \nu, \varepsilon) / \partial \nu \geq 0, \quad \partial K(E, \nu, \varepsilon) / \partial \varepsilon \leq 0, \dots, \partial c_l / \partial E \geq 0, \quad \partial c_l / \partial \rho_0 \leq 0,$$

найжены представления

$$\underline{K}_\alpha = (2/3) \underline{E}_\alpha (1 - \underline{\varepsilon}_\alpha) (\underline{\varepsilon}_\alpha (1 + \underline{\nu}_\alpha) + 2(1 - 2\underline{\nu}_\alpha))^{-1}, \quad \overline{K}_\alpha = (2/3) \overline{E}_\alpha (1 - \underline{\varepsilon}_\alpha) (\underline{\varepsilon}_\alpha (1 + \overline{\nu}_\alpha) + 2(1 - 2\overline{\nu}_\alpha))^{-1},$$

$$\underline{D}_\alpha = \inf_{\substack{\nu \in (\underline{\nu}_\alpha, \overline{\nu}_\alpha) \\ \varepsilon \in (\underline{\varepsilon}_\alpha, \overline{\varepsilon}_\alpha)}} D(\underline{E}_\alpha, \nu, \varepsilon), \quad \overline{D}_\alpha = \sup_{\substack{\nu \in (\underline{\nu}_\alpha, \overline{\nu}_\alpha) \\ \varepsilon \in (\underline{\varepsilon}_\alpha, \overline{\varepsilon}_\alpha)}} D(\overline{E}_\alpha, \nu, \varepsilon),$$

$$\underline{K}_{p\alpha} = \inf_{\substack{\nu \in (\underline{\nu}_\alpha, \overline{\nu}_\alpha) \\ \varepsilon \in (\underline{\varepsilon}_\alpha, \overline{\varepsilon}_\alpha) \\ \delta \in (\underline{\delta}_\alpha, \overline{\delta}_\alpha)}} K_p(\underline{E}_\alpha, \nu, \varepsilon, \delta), \quad \overline{K}_{p\alpha} = \sup_{\substack{\nu \in (\underline{\nu}_\alpha, \overline{\nu}_\alpha) \\ \varepsilon \in (\underline{\varepsilon}_\alpha, \overline{\varepsilon}_\alpha) \\ \delta \in (\underline{\delta}_\alpha, \overline{\delta}_\alpha)}} K_p(\overline{E}_\alpha, \nu, \varepsilon, \delta),$$

$$\underline{c}_{l\alpha} = \inf_{\substack{\nu \in (\underline{\nu}_\alpha, \overline{\nu}_\alpha) \\ \varepsilon \in (\underline{\varepsilon}_\alpha, \overline{\varepsilon}_\alpha) \\ \delta \in (\underline{\delta}_\alpha, \overline{\delta}_\alpha) \\ \delta_f \in (\underline{\delta}_{fa}, \overline{\delta}_{fa})}} c_l(\underline{E}_\alpha, \nu, \varepsilon, \delta, \underline{\rho}_{0\alpha}, \delta_f), \quad \overline{c}_{l\alpha} = \sup_{\substack{\nu \in (\underline{\nu}_\alpha, \overline{\nu}_\alpha) \\ \varepsilon \in (\underline{\varepsilon}_\alpha, \overline{\varepsilon}_\alpha) \\ \delta \in (\underline{\delta}_\alpha, \overline{\delta}_\alpha) \\ \delta_f \in (\underline{\delta}_{fa}, \overline{\delta}_{fa})}} c_l(\overline{E}_\alpha, \nu, \varepsilon, \delta, \underline{\rho}_{0\alpha}, \delta_f).$$

Полученные представления использованы в реализованных при исследованиях вычислительных алгоритмах с заданием схем варьирования значений $\nu, \varepsilon, \delta, \delta_f$ в соответствующих пределах на каждом из α - срезов, а количество рассматриваемых при этом α - уровней выбирается из соображений обеспечения необходимой точности вычислений в описании функций принадлежности для искомым нечетко-множественных оценок. Так, в частности, при задании нормированных нечетко-интервальных экзогенных параметров модуля Юнга $\tilde{E} : (7300, 11200, 12800, 13100)$ и коэффициента Пуассона $\tilde{\nu} : (0.38, 0.43, 0.45, 0.47)$ для изотропного полимерного материала-основы, а также усредненного значения коэффициента $\tilde{\varepsilon} : (0.5, 0.65, 0.75, 0.8)$ концентрации равномерно распределенных по объему сферических полостей-микронеоднородностей в пористой среде, функции принадлежности которых представлены на рис. 5, соответствующая функция принадлежности для оцениваемой эндогенной характеристики \tilde{K} имеет вид, приведенный на рис. 6.

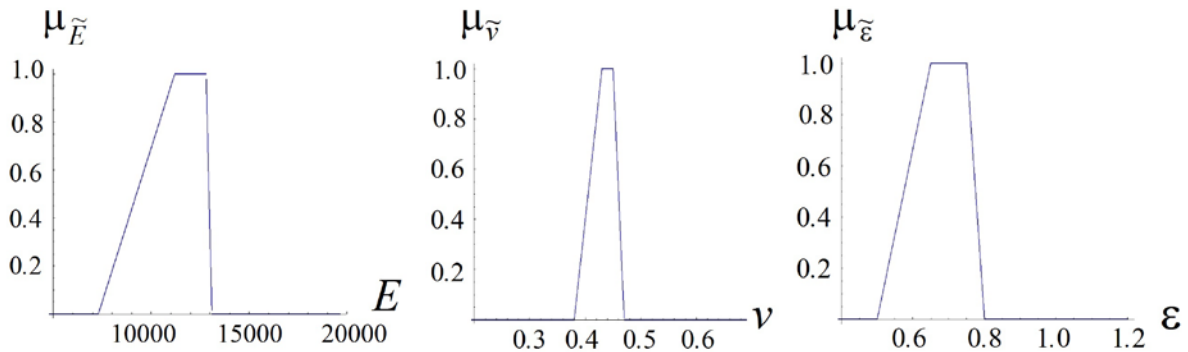


Рис. 5. Функции принадлежности для нечетко-множественных характеристик \tilde{E} , $\tilde{\nu}$, $\tilde{\varepsilon}$.

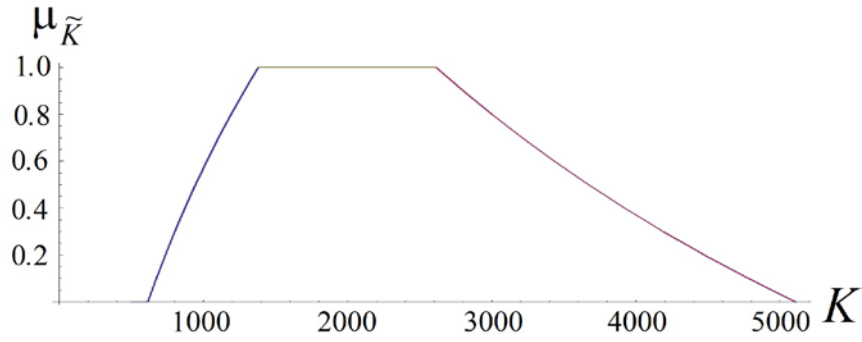


Рис. 6. Функция принадлежности для нечетко-множественной характеристики \tilde{K} .

Далее в главе осуществлен нечетко-множественный анализ прикладных моделей оценки рабочих характеристик перфорированных поперечно-анизотропных эластичных гидроакустических экранов с проскальзывающими либо жестко прикрепленными герметизирующими покрытиями в виде жестких металлических пластин. Описанная выше методология применяется к прикладным аналитическим расчетным соотношениям для импедансов Z тонких анизотропных перфорированных элементов гидроакустических экранов с различными типами герметизации образующих гексагональную решетку поперечных воздухозаполненных полостей, имеющим вид

$$Z^* = F(\rho, \tau, c_{11}, c_{12}, c_{13}, c_{33}) = [\rho(1-\tau^2)^2(c_{33} - 2c_{13}^2\tau^2[c_{11}(\tau^2 + 1) + c_{12}(\tau^2 - 1)]^{-1})]^{1/2}$$

в случае проскальзывающих покрытий, и вид

$$Z^{**} = F_1(\rho, \tau, h, c_{11}, c_{12}, c_{13}, c_{33}, c_{44}) = [\rho(1-\tau^2)^2(c_{33} - 2c_{13}\chi) \cdot \pi\{(8/(15\tau^2))(1-\tau^2)(c_{11} - c_{12} + (c_{11} + 2c_{33} - 4c_{13})\tau^2) - (8/3)h^{-2}c_{44}(3 + \tau^4 - 4\tau^2 + 4\ln\tau)\} / \{\pi(8/(15\tau^2))(1-\tau^2)(c_{11} - c_{12} + (c_{11} + 2c_{33} - 4c_{13})\tau^2)\}]^{1/2}$$

в случае жестко сцепленных с экраном покрытий, где $c_{11}, c_{12}, c_{13}, c_{33}$ – упругие постоянные поперечно-анизотропного материала экранирующего слоя с толщиной координатой, ориентированной вдоль оси изотропии; ρ – плотность материала экрана; τ – коэффициент перфорации ($0 \leq \tau \leq 1$). В разработанном варианте методики оценивания неконтрастности эндогенных параметров экранов также использованы разложения нечетко-интервальных экзогенных характеристик по множествам α – уровня

$$\tilde{\rho} = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [\tilde{\rho}_\alpha, \bar{\rho}_\alpha] = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [(1-\alpha)\rho_1 + \alpha\rho_2, \alpha\rho_3 + (1-\alpha)\rho_4],$$

$$\tilde{\tau} = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [\tilde{\tau}_\alpha, \bar{\tau}_\alpha] = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [(1-\alpha)\tau_1 + \alpha\tau_2, \alpha\tau_3 + (1-\alpha)\tau_4],$$

$$\tilde{c}_{ij} = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [c_{ij\alpha}, \bar{c}_{ij\alpha}] = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [(1-\alpha)c_{1ij} + \alpha c_{2ij}, \alpha c_{3ij} + (1-\alpha)c_{4ij}],$$

а эндогенные характеристики с учетом установленных свойств $\partial F / \partial \rho \geq 0$, $\partial F / \partial c_{11} \geq 0$, $\partial F / \partial c_{12} \leq 0$, $\partial F / \partial c_{13} \leq 0$, $\partial F / \partial c_{33} \geq 0$ и $\partial F_1 / \partial \rho \geq 0$ получены в виде

$$\tilde{Z}^* = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [\tilde{Z}_\alpha^*, \bar{Z}_\alpha^*], \quad \tilde{Z}^{**} = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [Z_\alpha^*, \bar{Z}_\alpha^*],$$

$$\tilde{Z}_\alpha^* = \inf_{\tau \in [\underline{\tau}_\alpha, \bar{\tau}_\alpha]} F(\underline{\rho}_\alpha, \tau_\alpha, \underline{c}_{11\alpha}, \bar{c}_{12\alpha}, \bar{c}_{13\alpha}, \underline{c}_{33\alpha}), \quad \bar{Z}_\alpha^* = \sup_{\tau \in [\underline{\tau}_\alpha, \bar{\tau}_\alpha]} F(\bar{\rho}_\alpha, \tau_\alpha, \bar{c}_{11\alpha}, \underline{c}_{12\alpha}, \underline{c}_{13\alpha}, \bar{c}_{33\alpha}),$$

$$Z_\alpha^{**} = \inf_{\tau \in [\underline{\tau}_\alpha, \bar{\tau}_\alpha], c_{ij} \in [c_{ij\alpha}, \bar{c}_{ij\alpha}], h \in [h_\alpha, \bar{h}_\alpha]} F_1(\underline{\rho}_\alpha, \tau, h, c_{11}, c_{12}, c_{13}, c_{33}, c_{44}),$$

$$\bar{Z}_\alpha^{**} = \sup_{\tau \in [\underline{\tau}_\alpha, \bar{\tau}_\alpha], c_{ij} \in [\underline{c}_{ij\alpha}, \bar{c}_{ij\alpha}], h \in [\underline{h}_\alpha, \bar{h}_\alpha]} F_1(\bar{\rho}_\alpha, \tau, h, c_{11}, c_{12}, c_{13}, c_{33}, c_{44}).$$

Представлены результаты ряда численных исследований на базе разработанной методики.

В главе 11 диссертации представлена разработка методики теоретического численно-аналитического анализа эффективности конструктивных решений для плоских элементов систем гидроакустического экранирования в виде перфорированного многосвязного изотропного деформируемого слоя с периодическим рядом параллельных плоским граням внутренних коллинеарных круговых цилиндрических полостей, с периодическим рядом коллинеарных внутренних эластичных цилиндрических включений из функционально-градиентных материалов с экспоненциальной радиальной неоднородностью деформативных свойств и плотности, либо с периодическим рядом однородных эластичных изотропных цилиндрических включений концентрического кольцевого сечения. Рассматриваемые экраны в виде слоя толщины $2h$ с параметрами Ламе λ, μ и плотностью ρ содержат заполненные либо незаполненные полости радиуса R ($R < h$) с центрами на оси Ox_1 и занимают в координатах $Ox_1x_2x_3$ область $V_L = \{-h \leq x_3 \leq h, (x_1, x_2) \in R^2\} \setminus \bigcup_{p=-\infty}^{\infty} V_p$, где

$V_p = \{(x_1 - 2pl)^2 + x_3^2 \leq R^2, -\infty < x_2 < \infty\}$ – полости с граничными поверхностями $\Gamma_p = \{(x_1 - 2pl)^2 + x_3^2 = R^2, -\infty < x_2 < \infty\}$. В их сечениях $x_2 = 0$ введены локальные полярные координатные системы $O_p r_p \theta_p$, $r_p \exp(i\theta_p) = x_1 - 2pl + ix_3$ с центрами в точках $O_p(2pl, 0, 0)$.

Полубесконечные области $V_+ = \{h < x_3, (x_1, x_2) \in R^2\}$ и $V_- = \{x_3 < -h, (x_1, x_2) \in R^2\}$ вне слоя заполнены идеальной слабосжимаемой жидкостью. Процессы распространения гидроакустических волн в V_+ , V_- , как и в предыдущих главах работы, описываются уравнениями для потенциалов φ_+, φ_- . При нормальном падении из глубины V_- плоской волны давления на границу $x_3 = -h$ слоя V_L в коллинеарных Ox_1x_3 плоскостях внутри экрана возникает поле динамической плоской деформации, описываемое потенциалами $\Phi(x_1, x_3, t), \Psi(x_1, x_3, t)$ для комплексного вектора волновых упругих перемещений

$$\vec{u}(x_1, x_3, t) = (u_1(x_1, x_3, t), u_3(x_1, x_3, t)) = \text{grad } \Phi(x_1, x_3, t) + \text{rot } \Psi(x_1, x_3, t) \cdot e_2$$

$$(\lambda + 2\mu)D^2\Phi(x_1, x_3, t) - \rho\partial^2 / \partial t^2 \Phi(x_1, x_3, t) = 0, \quad \mu D^2\Psi(x_1, x_3, t) - \rho\partial^2 / \partial t^2 \Psi(x_1, x_3, t) = 0.$$

На поверхностях контакта V_L с V_+ и V_- задаются условия $(\sigma_{33} - p_\pm)_{x_3=\pm h} = 0$, $(\sigma_{3j})_{x_3=\pm h} = 0$ ($j=1,2$), $(\partial_i u_3 - v_{3\pm})_{x_3=\pm h} = 0$. В исходном случае незаполненных полостей граничные условия на свободных от напряжений поверхностях Γ_p имеют вид $(\sigma_{rr}^{(L)}(R, \theta_p))_{\Gamma_p} = 0$, $(\sigma_{r\theta}^{(L)}(R, \theta_p))_{\Gamma_p} = 0$. В рамках применения теории Флоке для периодических по координате x_1 потенциалов волнового поля в V_L введены представления суперпозициями разнотипных базисных частных решений в основных Ox_1x_3 и локальных $O_p r_p \theta_p$ координатных системах с подлежащими определению группами постоянных коэффициентов $A_{n\pm}, C_{n\pm}, B_q, G_q$

$$\Phi = \left[\sum_{n=-\infty}^{\infty} (A_{n+} \exp(in\pi l^{-1}x_1 + \zeta_{n+}x_3) + A_{n-} \exp(in\pi l^{-1}x_1 + \zeta_{n-}x_3)) + \sum_{q=-\infty}^{\infty} B_q \sum_{p=-\infty}^{\infty} H_q^{(1)}(ar_p) \exp(iq\theta_p) \right] \cdot \exp(i\omega t),$$

$$\Psi = \left[\sum_{n=-\infty}^{\infty} (C_{n+} \exp(in\pi l^{-1}x_1 + \xi_{n+}x_3) + C_{n-} \exp(in\pi l^{-1}x_1 + \xi_{n-}x_3)) + \sum_{q=-\infty}^{\infty} G_q \sum_{p=-\infty}^{\infty} H_q^{(1)}(\beta r_p) \exp(iq\theta_p) \right] \cdot \exp(i\omega t),$$

где $\zeta_{n\pm} = \pm(\rho\omega^2 / (\lambda + 2\mu) + n^2\pi^2 / l^2)^{1/2}$, $\xi_{n\pm} = \pm(\rho\omega^2 / \mu + n^2\pi^2 / l^2)^{1/2}$, $a = (\lambda + 2\mu) / \mu$, $\alpha = (\rho\omega^2 / (\lambda + 2\mu))^{1/2}$, $\beta = (\rho\omega^2 / \mu)^{1/2}$, $H_q^{(1)}(z)$ - цилиндрические функции Ханкеля первого

рода с индексом q и аргументом z . В окрестностях граничных поверхностей Γ_{\pm} введенные потенциалы преобразуются к виду ортогональных по переменной x_1 рядов

$$\begin{aligned}\Phi_{\pm} &= \left[\sum_{n=-\infty}^{\infty} (A_{n+} \exp(in\pi l^{-1}x_1 + \zeta_{n+}x_3) + A_{n-} \exp(in\pi l^{-1}x_1 + \zeta_{n-}x_3)) + \right. \\ &+ \sum_{q=-\infty}^{\infty} B_q (2/l)(-i)^{q+1} \sum_{p=-\infty}^{\infty} \zeta_p^{-1} ((\zeta_p \pm q\pi l^{-1}) / (\zeta_p^2 - (q\pi l^{-1})^2)^{1/2})^q \cdot \exp(iq\pi l^{-1}x_1 \mp \zeta_{qp}x_3) \left. \right] \cdot \exp(i\omega t), \\ \Psi_{\pm} &= \left[\sum_{n=-\infty}^{\infty} (C_{n+} \exp(in\pi l^{-1}x_1 + \xi_{n+}x_3) + C_{n-} \exp(in\pi l^{-1}x_1 + \xi_{n-}x_3)) + \right. \\ &+ \sum_{q=-\infty}^{\infty} G_q (2/l)(-i)^{q+1} \sum_{p=-\infty}^{\infty} \zeta_p^{-1} ((\zeta_p \pm q\pi l^{-1}) / (\zeta_p^2 - (q\pi l^{-1})^2)^{1/2})^q \cdot \exp(iq\pi l^{-1}x_1 \mp \zeta_{qp}x_3) \left. \right] \cdot \exp(i\omega t),\end{aligned}$$

а на контуре Γ_0 в центральной локальной координатной системе с использованием обобщенных разложений Якоби и теорем сложения цилиндрических функций записываются в форме ортогональных разложений по переменной θ_0

$$\begin{aligned}\Phi &= \sum_{q=-\infty}^{\infty} \left[\sum_{n=-\infty}^{\infty} A_{n+} \chi_{nq+} J_q(\gamma_{n+}r_0) + \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_{n-} \chi_{nq-} J_q(\gamma_{n-}r_0) + B_q H_q^{(1)}(\alpha r_0) + S_q J_q(\alpha r_0) \right] \exp(iq\theta_0) \cdot \exp(i\omega t), \\ \Psi &= \sum_{q=-\infty}^{\infty} \left[\sum_{n=-\infty}^{\infty} C_{n+} \eta_{nq+} J_q(\delta_{n+}r_0) + \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_{n-} \eta_{nq-} J_q(\delta_{n-}r_0) + G_q H_q^{(1)}(\beta r_0) + P_q J_q(\beta r_0) \right] \exp(iq\theta_0) \cdot \exp(i\omega t),\end{aligned}$$

Дальнейшая реализация разработанной численно-аналитической методики заключается в получении на базе ортогональных разложений потенциалов Φ , Ψ соответствующих представлений ортогональными рядами для контурных характеристик $(\sigma_{rr})_{\Gamma_0}$, $(\sigma_{r\theta})_{\Gamma_0}$ волновых деформационных полей на центральной цилиндрической поверхности Γ_0 в экранирующем слое, а также контурных характеристик $(\sigma_{31}^{(\pm)})_{x_3=\pm h}$, $(\sigma_{33}^{(\pm)})_{x_3=\pm h}$, $(\partial_t u_3^{(\pm)})_{x_3=\pm h}$ и на его плоских гранях Γ_+ , Γ_- . С их использованием функциональные краевые условия рассматриваемой задачи эффективно трансформированы в бесконечные системы линейных алгебраических уравнений для коэффициентов $A_{n\pm}$, $C_{n\pm}$, B_q , G_q и амплитудных характеристик $P_1^{(-)}$, $P_0^{(+)}$ отраженной и генерируемой в заэкранном пространстве гидроакустических волн. При численной реализации описываемой методики системы подлежат редукции, порядок которой определяется на основе контроля качества удовлетворения граничным условиям.

В рассмотренном далее случае заполнения внутренних полостей экрана идеально контактирующими со слоем однотипными по физико-механическим свойствам вязкоупругими включениями I_p из изотропного функционально-градиентного радиально-неоднородного материала с модулями Ламе $\lambda_p = \lambda_0 \cdot \exp(\zeta r_p)$, $\mu_p = \mu_0 \cdot \exp(\zeta r_p)$ и плотностью $\rho_p = \rho_0 \cdot \exp(\zeta r_p)$, поля волновых упругих перемещений и динамических напряжений во включениях $\{u_{r_p}^{(l)}(r_p, \theta_p), u_{\theta_p}^{(l)}(r_p, \theta_p)\}$, $\sigma_{\alpha\beta}^{(l)}(r_p, \theta_p)$ ($\alpha, \beta = r_p, \theta_p$) в каждой из локальных координатных систем описываются построенными в виде ортогональных рядов по угловой переменной θ представлениями с подлежащими определению постоянными коэффициентами D_q

$$u_r = \sum_{q=-\infty}^{\infty} D_q F_{qr}(r) \exp(in\theta), \dots, \sigma_{rr} = \sum_{q=-\infty}^{\infty} D_q F_{qrr}(r) \exp(in\theta), \sigma_{r\theta} = \sum_{q=-\infty}^{\infty} D_q F_{qr\theta}(r) \exp(in\theta).$$

В этих представлениях функции $F_{qr}(r), \dots, F_{qr\theta}(r)$ в свою очередь с использованием рекуррентных соотношений построены в виде абсолютно сходящихся степенных рядов по радиальной переменной r . В случае же изотропных однородных цилиндрических включений кольцевого сечения соответствующие характеристики получены в виде

$$u_r(r, \theta) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} [A_n \frac{dJ_n(\alpha r)}{dr} + B_n \frac{in}{r} J_n(\beta r)] \exp(in\theta), \dots,$$

$$\sigma_{r\theta}(r, \theta) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \mu [A_n^{(1)} \{ \frac{2in}{r^2} J_n(\alpha r) \} + B_n^{(1)} \{ (-\frac{n^2}{r^2} J_n(\beta r) - \frac{1}{r} \frac{dJ_n(\beta r)}{dr}) - \frac{d^2 J_n(\beta r)}{dr^2} \}] \exp(in\theta) +$$

$$+ \sum_{n=-\infty}^{\infty} \mu [A_n^{(2)} \{ \frac{2in}{r^2} H_n^{(1)}(\alpha r) \} + B_n^{(2)} \{ (-\frac{n^2}{r^2} H_n^{(1)}(\beta r) - \frac{1}{r} \frac{dH_n^{(1)}(\beta r)}{dr}) - \frac{d^2 H_n^{(1)}(\beta r)}{dr^2} \}] \exp(in\theta).$$

Анализ моделей экранов с размещенными в их толще заполненными туннельными полостями на базе применения полученных ортогональных разложений также сведен к решению бесконечных систем линейных алгебраических уравнений, следующих из функциональных граничных условий идеального контакта материалов слоя и включений, и определяющих характеристики эффективности гидроакустического экранирования с применением конструкции данного типа. Описана также методология применения разработанной методики анализа для решения задач структурно-параметрической оптимизации моделей экранов с рассматриваемым типом перфорации.

В Приложении помещены документы, связанные с реализацией материалов диссертационного исследования.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В итоге выполненных в диссертационной работе теоретических исследований получен ряд научных результатов, относящихся к важной актуальной научно-технической проблеме моделирования, оптимизации и управления рабочими характеристиками технических систем для гидроакустической защиты и снижения уровней акустической активности конструкций и приборов подводных транспортных средств и подводных сооружений. На основе применения методов системного анализа и компьютерно-математического моделирования исследовано направление в области моделей функционирования и оптимизации систем гидроакустических экранов и защитных гидроакустических покрытий для корпусных конструкций и приборов подводных транспортных средств и сооружений, связанное с использованием в технических системах гидроакустического экранирования специфики свойств волнового деформирования современных классов анизотропных функционально-градиентных композиционных материалов.

Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Предложен подход к системному анализу многофакторных характеристик акустической активности подводных транспортных средств и сооружений, и к выработке стратегий ее снижения на основе нечеткой иерархической инструментально-экспертной модели комплексного учета источников генерирования, способов подавления и переориентации акустического излучения при наличии определенного круга механизмов структурно-параметрической оптимизации технических систем гидроакустического экранирования в условиях технологических и экономических ограничений.

2. На основе систематизации ведущих аспектов проблемы снижения гидроакустической активности подводных транспортных средств и сооружений, включая характеристику источников акустических полей и подходов к созданию гидроакустических экранов, защитных обтекателей и гидроакустических покрытий, создана нечеткая разветвленная иерархическая модель обобщенного индекса потенциального снижения гидроакустической активности, позволяющая вырабатывать оптимизированные стратегии совершенствования технических систем гидроакустического экранирования в условиях задания различных комплексов технологических ограничений.

3. Осуществлено построение и разработаны методы исследования математических моделей функционирования однослойных и многослойных плоских элементов систем гидроакустической защиты и экранирования для подводных транспортных

средств и сооружений из анизотропных однородных композиционных материалов триклинной системы; разработана методика определения оптимизированных технологических параметров для конструктивных решений в области создания высокоэффективных систем гидроакустического экранирования на базе использования материалов рассматриваемого класса с повышенной жесткостью для использования в условиях действия высоких гидростатических давлений.

4. Осуществлен анализ ряда конкретных моделей функционирования и структурно-параметрической оптимизации плоских гидроакустических экранов из вязкоупругих анизотропных материалов триклинной системы, включая однослойные и двухслойные плоские экраны с различными видами контакта слоев, с наличием жидкостных прослоек и тонких нерастяжимых покрытий на гранях.

5. Разработаны и апробированы методы численно-аналитического исследования и структурно-параметрической оптимизации моделей функционирования технических систем гидроакустического экранирования подводных транспортных средств сооружений с плоскими однослойными и многослойными трансверсально-изотропными элементами из вязкоупругих функционально-градиентных материалов.

6. Получены и исследованы соотношения моделей однослойных и многослойных плоских элементов из вязкоупругих функционально-градиентных анизотропных материалов триклинной системы для принятия конструкторских решений при разработке технических систем гидроакустического экранирования подводных транспортных средств с оптимизируемыми структурно-параметрическими характеристиками.

7. Осуществлены синтез и анализ предпроектных моделей функционирования и оптимизации параметров однослойных и двухслойных плоских элементов технических систем гидроакустического экранирования, изготовленных из вязкоупругих анизотропных материалов триклинной системы и обладающих экспоненциально-степенной неоднородностью физико-механических характеристик.

8. Разработаны усовершенствованные модели функционирования цилиндрических анизотропных функционально-градиентных элементов систем экранирования гидроакустических преобразователей и антенн и теоретические методики структурно-параметрической оптимизации их рабочих характеристик, перспективные для дальнейших конструктивных решений по обеспечению характеристик направленности и снижению уровней сигнального шума.

9. Предложены усовершенствованные расчетные схемы поддержки конструкторских решений по проблеме структурно-параметрической оптимизации характеристик многосвязных перфорированных анизотропных пластинчатых элементов технических систем гидроакустического экранирования подводных транспортных средств и подводных сооружений с герметизированными полостями в рамках применения прикладных моделей для описания их деформационных свойств.

10. Предложена методика построения и численно-аналитического оптимизационного анализа свободной от упрощающих гипотез пространственной модели поперечно-анизотропного функционально-градиентного перфорированного гидроакустического экрана с герметизированными поперечными полостями при учете обусловленных гидростатическим давлением начальных деформаций в рамках линеаризованной теории сжимаемых предварительно-напряженных сред.

11. Разработаны и исследованы прикладные модели нечеткого оценивания рабочих характеристик перфорированных анизотропных гидроакустических экранов с герметизирующими покрытиями на базе применения нечетко-множественных методик учета неконтрастности в задании экзогенных физико-механических и геометрических параметров.

12. Предложены и исследованы нечеткие оптимизационные модели анизотропных функционально-градиентных элементов технических систем гидроакустического экранирования подводных транспортных средств с учетом факторов неопределенности в задании параметров их конструктивного исполнения и функционирования.

13. Предложена методика моделирования и оптимизации рабочих характеристик пространственных пластинчатых элементов технических систем гидроакустического экранирования с внутренней перфорацией параллельными граням однотипными цилиндрическими полостями.

14. Осуществлена систематизация ряда исследованных эффектов, представляющих интерес в предпроектных расчетах оптимизированных конструкционных элементов для технических систем гидроакустического экранирования подводных транспортных средств.

15. Предложены эффективные варианты решения проблемы выбора оптимизированных конструкций гидроакустических экранов исследованного типа в технических системах с учетом комплекса условий, касающихся частотных диапазонов функционирования и ограничений по геометрическим и физико-механическим характеристикам.

16. Разработаны комплексы программных приложений для реализации предложенных теоретических методик исследования и оптимизации характеристик конструкций гидроакустических экранов с комплексом усложненных физико-механических и геометрических свойств.

17. Представлены данные, характеризующие опыт эффективного практического применения ряда основных результатов проведенных исследований при конструировании технических систем гидроакустического экранирования для отдельных типов подводных транспортных средств.

18. Результаты диссертационной работы получили свое применение в виде практического внедрения на ряде предприятий и институтов различных стран. В частности, математические модели и алгоритмы реализованы в виде методик и комплексов прикладных программ и использовались: в научно-исследовательских и опытно - конструкторских работах Технического Института Военно-Морского флота Вьетнама; в учебных курсах «Системное проектирование» в Морском Университете г. Хайфон, Вьетнам; в опытно - конструкторских работах научно-производственных компаний судостроительного сектора Вьетнама.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Болнокин В.Е., Сторожев В.И., Зыонг Минь Хай Модели и методы синтеза системы экранирования виброизлучений в жидкой среде слоем функционально-неоднородного анизотропного материала // Системы управления и информационные технологии. – 2015. – №3 (61). – С. 71-75.

2. Болнокин В.Е., Сторожев В.И., Зыонг Минь Хай Модель трансформационного акустического экранирования виброизлучений в жидкой среде // Системы управления и информационные технологии. – 2015. – №3.1 (61). – С. 130-134.

3. Болнокина Е.В., Зыонг Минь Хай, Кустов А.Ю. Модели формирования организационных структур кластерного типа на основе системно-интегрированного подхода // Экономика и менеджмент систем управления. – 2015. – № 2.2 (16). – С. 235-243.

4. Мутин Д.И., Зыонг Минь Хай, Кустов А.Ю. Методы построения эволюционной модели инновационного развития интегрированных компаний // Экономика и менеджмент систем управления. – 2015. – № 2.2 (16). – С. 235-243.

5. Болнокин В.Е., Сторожев В.И., Минь Хай Зыонг. Модель плоского многослойного гидроакустического экрана с анизотропными функционально-градиентными компонентами // Вестн. Воронежского гос. ун-та. Сер.: Системный анализ и информационные технологии. – 2016. – № 1. – С. 21–27.

6. Болнокин В.Е., Сторожев В.И., Чувииков Д.А., Зыонг Минь Хай. Анализ волновых полей в единичном цилиндрическом полове электроакустическом преобразователе

гидроакустической антенны // Современные наукоемкие технологии.– 2017. – №5. – С. 18-23.

7. Болнокин В.Е., Чувилов Д.А., Нгуен Динь Чунг, Зыонг Минь Хай. Применение многосерверных систем обработки информации для управления транспортными процессами морского порта // Фундаментальные исследования. – 2017.– № 5. – С. 26-30.

8. Болнокин В.Е., Сторожев В.И., Зыонг Минь Хай. Иерархическая нечеткая модель гидроакустической активности подводных транспортных средств // Экономика и менеджмент систем управления .- 2017.- № 4.- С. 49-60.

9. Болнокин В.Е., Зыонг Минь Хай, Сторожев С.В. Методика нечеткого оценивания эндогенных характеристик в моделях анизотропных функционально-градиентных гидроакустических экранов // Экономика и менеджмент систем управления .- 2017.- № 4.2(26).- С. 204- 210.

10. Болнокин В.Е., Зыонг Минь Хай, Сторожев С.В. Нечеткие оценки эффективных характеристик микронеоднородных материалов для конструкций гидроакустического экранирования // Системы управления и информационные технологии.- 2017.- №4(70).- С. 4-8.

11. Болнокин В.Е., Зыонг Минь Хай, Сторожев С.В. Нечетко-множественный анализ влияния факторов неопределенности в модели трансверсально-изотропного функционально-градиентного гидроакустического экрана // Экономика и менеджмент систем управления. – 2018. – № 2 (28). – С. 71 – 78.

12. Болнокин В.Е., Сторожев В.И., Зыонг Минь Хай. Пространственная модель оценки характеристик функционирования предварительно-напряженного перфорированного анизотропного гидроакустического экрана // Системы управления и информационные технологии. – 2018.- №2(72). – С. 4-8

**Публикация в научном сборнике, входящим в Международную
научнометрическую базу данных MathSciNet и в перечень ВАК РФ**

13. Болнокин В.Е., Митрушкин Е.И., Зыонг Минь Хай, Сторожев С.В. Нечеткая модель взаимодействия гидроакустических волн с плоским вязкоупругим трансверсально-изотропным экраном // Механика твердого тела. – 2018. – Вып. 48. – С. 84 – 95.

Монографии

14. Болнокин В.Е., Сторожев В.И., Зыонг Минь Хай. Исследование систем гидроакустического экранирования для подводных транспортных средств.- Москва-Воронеж: Научная книга, 2016 – 196 с.

15. Болнокин В.Е., Сторожев В.И., Зыонг Минь Хай Системы гидроакустического экранирования для подводных транспортных средств. – Воронеж, Научная книга, 2017. – 252 с.

16. V.E. Bolnokin, V.I. Storozhev, Duong Minh Hai. Nghien Cuu Cac He Thong Chan On Thuy Am Tren Phuong Tien Van Tai Ngam. Sach chuyen khao – Monograph. – Vietnam, Nha xuất bản Hong Duc, 2016. – 196 pp.

В других изданиях:

17. Bolnokin V.E., Storozhev V.I., Ziong Minh Hai. Analysis of the model of a flat hydroacoustic screen with a periodic system of internal tunneling radially inhomogeneous cylindrical inclusions // Modern informatization problems in simulation and social technologies: Proceedings of the XXIII-th International Open Science Conference (Yelm, WA, USA, January 2018)/ Editor in Chief Dr. Sci., Prof. O.Ja. Kravets. - Yelm, WA, USA: Science Book Publishing House, 2018. – P. 116- 120.

18. Bolnokin V.E, Duong Minh Hai, Storozhev V.I. Hydroacoustic screening by using a layer from anisotropic functionally graded material with exponential inhomogeneity along thickness direction. Summer-2015, Modeling and Information Technologies Selected Papers, Science Book Publishing House, Yelm, WA, USA 2015.- 8p. (Bolnokin V.E, Duong Minh Hai, Storozhev V.I. Phương pháp chống tiếng ồn từ bức xạ rung trong môi trường chất lỏng bằng lớp vật liệu dị hướng không đồng nhất chức năng. Số Summer 2015, Tạp chí Mô hình và Công nghệ. Nhà xuất bản Sách Khoa học, Yelm, WA, Mĩ năm 2015- 8 trang).

19. В.Е. Болнокин, Зыонг Минь Хай, В.И. Сторожев. Модель трансформационного акустического экранирования виброизлучений в жидкой среде. Журнал «Морская Наука и Технология» Морского Университета Вьетнама, город Хайфон, СРВ, №1 марта 2014 года, с. 21-30 – (Mô hình biến đổi âm để chống tiếng ồn từ bức xạ rung trong môi trường chất lỏng. Tạp chí “Khoa học và Công nghệ biển” Trường Đại học học Hàng Hải, thành phố Hải Phòng, số 1, tháng 3 năm 2014. P. 21-30).

20. V.E. Bolnokin, Dương Minh Hải, V.I. Storozhev. Phương pháp chống ồn thủy âm bằng lớp vật liệu dị hướng gradient chức năng với độ dày không đồng nhất theo luật hàm số mũ-lũy thừa. Tạp chí “Khoa học và Công nghệ biển” Trường Đại học học Hàng Hải, thành phố Hải Phòng, số 3, tháng 10 năm 2014. Trg. 13-22-(В.Е. Болнокин, Зыонг Минь Хай, В.И. Сторожев. Гидроакустическое экранирование слоем из анизотропного функционально-градиентного материала с экспоненциально-степенной толщинной неоднородностью. Журнал «Морская Наука и Технология» Морского Университета Вьетнама, город Хайфон, СРВ, № 3 октября 2014 года. С. 13-22).

21. V.E. Bolnokin, V.I. Storozhev, Dương Minh Hải. Mô hình tính toán tối ưu hóa các đặc trưng của hệ thống chấn tử chấn ồn gradient chức năng dị hướng cho các anten thủy âm hình trụ. Tạp chí “Khoa học và Công nghệ biển” Trường Đại học học Hàng Hải, thành phố Hải Phòng, №4, tháng 11 năm 2015. Trg. 32-41.-(В.Е. Болнокин, Зыонг Минь Хай, В.И. Сторожев. Модель оптимизационного расчета характеристик системы анизотропных функционально-градиентных элементов экранирования для цилиндрических гидроакустических антенн.

Журнал «Морская Наука и Технология» Морского Университета Вьетнама, город Хайфон, СРВ, № 4 ноября 2015 года. С. 32-41.).

22. Зыонг Минь Хай и сотрудники. Общее исследование влияний факторов морской среды на распространение акустической волны и дальность действия гидроакустических систем сонаров. Государственная научная тема: “Исследование влияний факторов морской среды на дальность действия гидроакустических средств” под зарегистрированным Кодом: КС.09.04/11-15. Номер 2.1. Время выполнения: 2012-2015 гг. 25 с. - (Dương Minh Hải và nhóm tác giả. Nghiên cứu tổng quan tác động các yếu tố môi trường biển tới lan truyền sóng âm – tầm hoạt động hệ thống sona. Đề tài khoa học cấp nhà nước “Nghiên cứu ảnh hưởng của các yếu tố môi trường biển ảnh hưởng đến tầm hoạt động của các thiết bị thủy âm”. Mã số: КС.09.04/11-15. Số 2.1. Năm thực hiện 2012 đến 2015. 25 trang).

23 Зыонг Минь Хай и сотрудники. Исследование влияний гидроакустического поля на морскую среду. Государственная научная тема: “Исследование влияний факторов морской среды на дальность действия гидроакустических средств” под зарегистрированным кодом: КС.09.04/11-15. № 2.2. Время выполнения: 2012-2015 гг. Объем: 6 томов, 150 с. - (Dương Minh Hải và nhóm tác giả. Nghiên cứu ảnh hưởng của trường thủy âm trong môi trường nước biển. Đề tài khoa học cấp nhà nước “Nghiên cứu ảnh hưởng của các yếu tố môi trường biển ảnh hưởng đến tầm hoạt động của các thiết bị thủy âm”. Số 2.2. Mã số: КС.09.04/11-15. Năm thực hiện 2012 đến 2015. Gồm 6 cuốn, 150 trang).

24. Зыонг Минь Хай и сотрудники. Исследование влияний факторов морской среды на потери энергии распространения акустической волны на дальность действия гидроакустических систем. Государственная научная тема: “Исследование влияний факторов морской среды на дальность действия гидроакустических средств” под зарегистрированным Кодом: КС.09.04/11-15. № 2.3. Время выполнения: 2012-2015 гг. 2 тома, 50 с. - (Dương Minh Hải và nhóm tác giả. Nghiên cứu ảnh hưởng các yếu tố môi trường biển tới mức tổn hao năng lượng khi lan truyền sóng âm đến tầm hoạt động của hệ thống thủy âm. Đề tài khoa học cấp nhà nước “Nghiên cứu ảnh hưởng của các yếu tố môi trường biển ảnh hưởng đến tầm hoạt động của các thiết bị thủy âm”. Số 2.3. Mã số: КС.09.04/11-15. Năm thực hiện 2012 đến 2015. Gồm 2 cuốn; 50 trang).

25. Зыонг Минь Хай и сотрудники. Исследование методов измерения для определения факторов морской среды, влияющих на распространение акустической волны. Государственная научная тема: “Исследование влияний факторов морской среды на

дальность действия гидроакустических средств” под зарегистрированным Кодом: КС.09.04/11-15. № 2.4. Время выполнения: 2012-2015 гг. Объем: 2 тома 48 с. - (Nghiên cứu các phương pháp đo xác định các yếu tố môi trường biển có ảnh hưởng tới lan truyền sóng âm. Số 2.4; gồm 2 cuốn; 48 trang; năm 2012 đến 2015. Dương Minh Hải và nhóm tác giả thực hiện đề tài khoa học cấp nhà nước: “Nghiên cứu ảnh hưởng của các yếu tố môi trường biển ảnh hưởng đến tầm hoạt động của các thiết bị thủy âm. Mã số: КС.09.04/11-15).

26. Зыонг Минь Хай и сотрудники. Исследование влияний условий морской поверхности на распространение акустической волны. Государственная научная тема: “Исследование влияний факторов морской среды на дальность действия гидроакустических средств” под зарегистрированным Кодом: КС.09.04/11-15. № 2.5. Время выполнения: 2012-2015 гг. Объем: 2 тома 67 с. – (Nghiên cứu ảnh hưởng của bề mặt biển khi lan truyền sóng âm. Số 2.5; gồm 2 cuốn; 67 trang; năm 2012 đến 2015. Dương Minh Hải và nhóm tác giả thực hiện đề tài khoa học cấp nhà nước: “Nghiên cứu ảnh hưởng của các yếu tố môi trường biển ảnh hưởng đến tầm hoạt động của các thiết bị thủy âm. Mã số: КС.09.04/11-15)

27. Зыонг Минь Хай и сотрудники. Исследование влияний топографии морского дна на распространение акустической волны. Государственная научная тема: “Исследование влияний факторов морской среды на дальность действия гидроакустических средств” под зарегистрированным Кодом: КС.09.04/11-15. № 2.6. Время выполнения: 2012-2015 гг. Объем: 2 тома 42 с. – (Dương Minh Hải và nhóm tác giả. Nghiên cứu ảnh hưởng của đáy biển khi lan truyền sóng âm. Số 2.6; gồm 2 cuốn; 42 trang; năm 2012 đến 2015. Dương Minh Hải và nhóm tác giả thực hiện đề tài khoa học cấp nhà nước: “Nghiên cứu ảnh hưởng của các yếu tố môi trường biển ảnh hưởng đến tầm hoạt động của các thiết bị thủy âm. Mã số: КС.09.04/11-15).

28. Зыонг Минь Хай и сотрудники. Исследование помех, шумов на море влияющие на дальность действия гидроакустических систем. Государственная научная тема: “Исследование влияний факторов морской среды на дальность действия гидроакустических средств” под зарегистрированным Кодом: КС.09.04/11-15. № 2.7. Время выполнения: 2012-2015 гг. Объем: 6 томов 290 с. – (Dương Minh Hải và nhóm tác giả. Nghiên cứu các loại nhiễu, tạp âm trên biển ảnh hưởng tới tầm hoạt động của hệ thống thủy âm. Số 2.7; gồm 6 cuốn; 290 trang; năm 2012 đến 2015. Dương Minh Hải và nhóm tác giả thực hiện đề tài khoa học cấp nhà nước: “Nghiên cứu ảnh hưởng của các yếu tố môi trường biển ảnh hưởng đến tầm hoạt động của các thiết bị thủy âm. Mã số: КС.09.04/11-15).

29. Зыонг Минь Хай и сотрудники. Исследование влияний факторов в глубоководных районах на распространение акустической волны. Государственная научная тема: “Исследование влияний факторов морской среды на дальность действия гидроакустических средств” под зарегистрированным Кодом: КС.09.04/11-15. № 2.8. Время выполнения: 2012-2015 гг. Объем: 1 том 22 с. -(Dương Minh Hải và nhóm tác giả. Nghiên cứu ảnh hưởng của các yếu tố khu vực biển sâu tới lan truyền sóng âm. Số 2.8; gồm 1 cuốn; 22 trang; năm 2012 đến 2015. Dương Minh Hải và nhóm tác giả thực hiện đề tài khoa học cấp nhà nước: “Nghiên cứu ảnh hưởng của các yếu tố môi trường biển ảnh hưởng đến tầm hoạt động của các thiết bị thủy âm. Mã số: КС.09.04/11-15).

30. Зыонг Минь Хай и сотрудники. Исследование влияний факторов в мелководных районах на распространение акустической волны. Государственная научная тема: “Исследование влияний факторов морской среды на дальность действия гидроакустических средств” под зарегистрированным Кодом: КС.09.04/11-15. № 2.9. Время выполнения: 2012-2015 гг. Объем: 15 с. – (Dương Minh Hải và nhóm tác giả. Nghiên cứu ảnh hưởng các yếu tố khu vực biển nông tới lan truyền sóng âm. Số 2.9; gồm 1 cuốn; 15 trang; năm 2012 đến 2015. Dương Minh Hải và nhóm tác giả thực hiện đề tài khoa học cấp nhà nước: “Nghiên cứu ảnh hưởng của các yếu tố môi trường biển ảnh hưởng đến tầm hoạt động của các thiết bị thủy âm. Mã số: КС.09.04/11-15).

31. Зыонг Минь Хай и сотрудники. Исследование влияний характеристик и параметров приборов на дальность действия гидроакустических систем. Государственная научная тема: “Исследование влияний факторов морской среды на дальность действия гидроакустических

средств” под зарегистрированным Кодом: КС.09.04/11-15. № 2.10. Время выполнения: 2012-2015 гг. Объем: 4 тома 220 с. – (Dương Minh Hải và nhóm tác giả. Nghiên cứu ảnh hưởng của tính năng và tham số thiết bị tới tầm hoạt động của các hệ thống thủy âm. Số 2.10; gồm 4 cuốn; 220 trang; năm 2012 đến 2015. Dương Minh Hải và nhóm tác giả thực hiện đề tài khoa học cấp nhà nước: “Nghiên cứu ảnh hưởng của các yếu tố môi trường biển ảnh hưởng đến tầm hoạt động của các thiết bị thủy âm. Mã số: КС.09.04/11-15.

32. Зыонг Минь Хай и сотрудники. Исследование зависимости дальности действия гидроакустических средств от помех несущих средств. Государственная научная тема: *“Исследование влияния факторов морской среды на дальность действия гидроакустических средств” под зарегистрированным Кодом: КС.09.04/11-15. № 2.11. Время выполнения: 2012-2015 гг. Объем: 1 том 30 с. – (Dương Minh Hải và nhóm tác giả. Nghiên cứu sự phụ thuộc tầm hoạt động của thiết bị thủy âm vào nhiễu phương tiện mang. Số 2.11; gồm 1 cuốn; 30 trang; năm 2012 đến 2015. Dương Minh Hải và nhóm tác giả thực hiện đề tài khoa học cấp nhà nước: “Nghiên cứu ảnh hưởng của các yếu tố môi trường biển ảnh hưởng đến tầm hoạt động của các thiết bị thủy âm. Mã số: КС.09.04/11-15).*

33. Зыонг Минь Хай и сотрудники. Исследование зависимости дальности действия гидроакустических средств от характеристик объектов-целей. Государственная научная тема: *“Исследование влияния факторов морской среды на дальность действия гидроакустических средств” под зарегистрированным Кодом: КС.09.04/11-15. № 2.12. Время выполнения: 2012-2015 гг. Объем: 2 тома 50 с. – (Dương Minh Hải và nhóm tác giả. Nghiên cứu sự phụ thuộc cự ly hoạt động của thiết bị thủy âm vào đặc tính của mục tiêu. Số 2.12; gồm 2 cuốn; 50 trang; năm 2012 đến 2015. Dương Minh Hải và nhóm tác giả thực hiện đề tài khoa học cấp nhà nước: “Nghiên cứu ảnh hưởng của các yếu tố môi trường biển ảnh hưởng đến tầm hoạt động của các thiết bị thủy âm. Mã số: КС.09.04/11-15).*

34. Зыонг Минь Хай и сотрудники. Исследование моделей и способов вычисления влияния морской среды на гидроакустических системы по лучевому способу. Государственная научная тема: *“Исследование влияния факторов морской среды на дальность действия гидроакустических средств” под зарегистрированным Кодом: КС.09.04/11-15. № 2.13. Время выполнения: 2012-2015 гг. Объем: 3 тома 95 с. – (Dương Minh Hải và nhóm tác giả. Nghiên cứu mô hình và phương pháp tính ảnh hưởng môi trường biển đến hệ thống thủy âm theo phương pháp tia sóng. Số 2.13; gồm 3 cuốn; 95 trang; năm 2012 đến 2015. Dương Minh Hải và nhóm tác giả thực hiện đề tài khoa học cấp nhà nước: “Nghiên cứu ảnh hưởng của các yếu tố môi trường biển ảnh hưởng đến tầm hoạt động của các thiết bị thủy âm. Mã số: КС.09.04/11-15).*

35. Зыонг Минь Хай и сотрудники. Исследование влияния разных методов измерения на модели и методы вычисления. Государственная научная тема: *“Исследование влияния факторов морской среды на дальность действия гидроакустических средств” под зарегистрированным Кодом: КС.09.04/11-15. № 2.14. Время выполнения: 2012-2015 гг. Объем: 7 томов 175 с. – (Dương Minh Hải và nhóm tác giả. Nghiên cứu mô hình tính và phương pháp tính ảnh hưởng theo các phương pháp khác. Số 2.14; gồm 7 cuốn; 175 trang; năm 2012 đến 2015. Dương Minh Hải và nhóm tác giả thực hiện đề tài khoa học cấp nhà nước: “Nghiên cứu ảnh hưởng của các yếu tố môi trường biển ảnh hưởng đến tầm hoạt động của các thiết bị thủy âm. Mã số: КС.09.04/11-15).*

36. Зыонг Минь Хай и сотрудники. Исследование алгоритмов вычисления параметров гидроакустических систем. Государственная научная тема: *“Исследование влияния факторов морской среды на дальность действия гидроакустических средств” под зарегистрированным Кодом: КС.09.04/11-15. № 2.15. Время выполнения: 2012-2015 гг. Объем: 6 томов 180 с. – (Dương Minh Hải và nhóm tác giả. Nghiên cứu giải thuật tính tham số của các hệ thống thủy âm. Số 2.15; gồm 6 cuốn; 180 trang; năm 2012 đến 2015. Dương Minh Hải và nhóm tác giả thực hiện đề tài khoa học cấp nhà nước: “Nghiên cứu ảnh hưởng của các yếu tố môi trường biển ảnh hưởng đến tầm hoạt động của các thiết bị thủy âm. Mã số: КС.09.04/11-15).*

37. Зыонг Минь Хай и сотрудники. Исследование алгоритмов вычисления максимальных дальностей обнаружения цели в идентичной безграничной среде. Государственная научная тема: *“Исследование влияния факторов морской среды на дальность действия гидроакустических средств”* под зарегистрированным Кодом: КС.09.04/11-15. № 2.16. Время выполнения: 2012-2015 гг. Объем: 3 тома 75 с. – (Dương Minh Hải và nhóm tác giả. Nghiên cứu giải thuật tính cự ly tối đa phát hiện mục tiêu trong môi trường đồng nhất không biên. *Số 2.16; gồm 3 cuốn; 75 trang; năm 2012 đến 2015. Dương Minh Hải và nhóm tác giả thực hiện đề tài khoa học cấp nhà nước: “Nghiên cứu ảnh hưởng của các yếu tố môi trường biển ảnh hưởng đến tầm hoạt động của các thiết bị thủy âm. Mã số: КС.09.04/11-15.*

38. Зыонг Минь Хай и сотрудники. Исследование алгоритмов определения срезов расположения акустических скоростей по глубинам. Государственная научная тема: *“Исследование влияния факторов морской среды на дальность действия гидроакустических средств”* под зарегистрированным Кодом: КС.09.04/11-15. № 2.17. Время выполнения: 2012-2015 гг. Объем: 1 том 32 с. – (Dương Minh Hải và nhóm tác giả. Nghiên cứu giải thuật xác định lát cắt phân bố vận tốc âm theo độ sâu. *Số 2.17; gồm 1 cuốn; 32 trang; năm 2012 đến 2015. Dương Minh Hải và nhóm tác giả thực hiện đề tài khoa học cấp nhà nước “Nghiên cứu ảnh hưởng của các yếu tố môi trường biển ảnh hưởng đến tầm hoạt động của các thiết bị thủy âm. Mã số: КС.09.04/11-15).*

39. Зыонг Минь Хай и сотрудники. Исследование алгоритмов определения типов преломлений акустических волн. Государственная научная тема: *“Исследование влияния факторов морской среды на дальность действия гидроакустических средств”* под зарегистрированным Кодом: КС.09.04/11-15. № 2.18. Время выполнения: 2012-2015 гг. Объем: 2 тома 48 с. – (Dương Minh Hải và nhóm tác giả. Nghiên cứu giải thuật xác định các dạng khúc xạ. *Số 2.18; gồm 2 cuốn; 48 trang; năm 2012 đến 2015. Dương Minh Hải và nhóm tác giả thực hiện đề tài khoa học cấp nhà nước: “Nghiên cứu ảnh hưởng của các yếu tố môi trường biển ảnh hưởng đến tầm hoạt động của các thiết bị thủy âm. Mã số: КС.09.04/11-15).*

40. Зыонг Минь Хай и сотрудники. Исследование алгоритмов группировки волновых лучей по типам их преломлений. Государственная научная тема: *“Исследование влияния факторов морской среды на дальность действия гидроакустических средств”* под зарегистрированным Кодом: КС.09.04/11-15. № 2.19. Время выполнения: 2012-2015 гг. Объем: 2 тома 50 с. – (Dương Minh Hải và nhóm tác giả. Nghiên cứu giải thuật phân nhóm các tia sóng theo các dạng khúc xạ. *Số 2.19; gồm 2 cuốn; 50 trang; năm 2012 đến 2015. Dương Minh Hải và nhóm tác giả thực hiện đề tài khoa học cấp nhà nước: “Nghiên cứu ảnh hưởng của các yếu tố môi trường biển ảnh hưởng đến tầm hoạt động của các thiết bị thủy âm. Mã số: КС.09.04/11-15.*

41. Зыонг Минь Хай и сотрудники. Исследование алгоритмов вычисления и построения траекторий волновых лучей в неидентичной среде. Государственная научная тема: *“Исследование влияния факторов морской среды на дальность действия гидроакустических средств”* под зарегистрированным Кодом: КС.09.04/11-15. № 2.20. Время выполнения: 2012-2015 гг. Объем: 1 том 30 с. – (Dương Minh Hải và nhóm tác giả. Nghiên cứu giải thuật tính và xây dựng quỹ đạo các tia sóng trong môi trường không đồng nhất. *Số 2.20; gồm 1 cuốn; 30 trang; năm 2012 đến 2015. Dương Minh Hải và nhóm tác giả thực hiện đề tài khoa học cấp nhà nước: “Nghiên cứu ảnh hưởng của các yếu tố môi trường biển ảnh hưởng đến tầm hoạt động của các thiết bị thủy âm. Mã số: КС.09.04/11-15).*

42. Зыонг Минь Хай и сотрудники. Исследование алгоритмов вычисляющих влияния морских поверхностей, дна на параметры и позиции приемных и излучательных гидроакустических антенн. Государственная научная тема: *“Исследование влияния факторов морской среды на дальность действия гидроакустических средств”* под зарегистрированным Кодом: КС.09.04/11-15. № 2.21. Время выполнения: 2012-2015 гг. Объем: 1 том 37 с. – (Dương Minh Hải và nhóm tác giả. Nghiên cứu giải thuật tính ảnh hưởng của bề mặt, đáy biển với tham số và vị trí anten thủy âm thu và phát. *Số 2.21; gồm 1 cuốn; 37 trang; năm 2012 đến 2015. Dương Minh Hải và nhóm tác giả thực hiện đề tài khoa học cấp nhà nước: “Nghiên cứu ảnh*

hưởng của các yếu tố môi trường biển ảnh hưởng đến tầm hoạt động của các thiết bị thủy âm. Mã số: KC.09.04/11-15).

43. Зыонг Минь Хай и сотрудники. Исследование алгоритмов вычисления параметров потерей. Государственная научная тема: *“Исследование влияний факторов морской среды на дальность действия гидроакустических средств” под зарегистрированным Кодом: KC.09.04/11-15. № 2.22.* Время выполнения: 2012-2015 гг. Объем: 2 тома 52 с. – (Dương Minh Hải và nhóm tác giả. Nghiên cứu giải thuật tính tham số tổn hao. *Số 2.22; gồm 2 cuốn; 52 trang; năm 2012 đến 2015. Dương Minh Hải và nhóm tác giả thực hiện đề tài khoa học cấp nhà nước: “Nghiên cứu ảnh hưởng của các yếu tố môi trường biển ảnh hưởng đến tầm hoạt động của các thiết bị thủy âm. Mã số: KC.09.04/11-15).*

44. Зыонг Минь Хай и сотрудники. Исследование алгоритмов вычисления дальностей обнаружения целей в разных гидрологических условиях. Государственная научная тема: *“Исследование влияний факторов морской среды на дальность действия гидроакустических средств” под зарегистрированным Кодом: KC.09.04/11-15. № 2.23.* Время выполнения: 2012-2015 гг. Объем: 4 тома 98 с. – (Dương Minh Hải và nhóm tác giả. Nghiên cứu giải thuật tính cự ly phát hiện mục tiêu trong các điều kiện thủy văn khác nhau. *Số 2.23; gồm 4 cuốn; 98 trang; năm 2012 đến 2015. Dương Minh Hải và nhóm tác giả thực hiện đề tài khoa học cấp nhà nước: “Nghiên cứu ảnh hưởng của các yếu tố môi trường biển ảnh hưởng đến tầm hoạt động của các thiết bị thủy âm. Mã số: KC.09.04/11-15.*

45. Зыонг Минь Хай и сотрудники. Создание схемы алгоритмов для определения моделей влияния морской среды на распространение гидроакустических волн. Государственная научная тема: *“Исследование влияний факторов морской среды на дальность действия гидроакустических средств” под зарегистрированным Кодом: KC.09.04/11-15. № 2.24.* Время выполнения: 2012-2015 гг. Объем: 1 том 37 с. - (Dương Minh Hải và nhóm tác giả. Xây dựng lưu đồ thuật toán cho mô hình tính toán sự ảnh hưởng của môi trường biển đến lan truyền sóng âm. *Số 2.24; gồm 1 cuốn; 37 trang; năm 2012 đến 2015. Dương Minh Hải và nhóm tác giả thực hiện đề tài khoa học cấp nhà nước: “Nghiên cứu ảnh hưởng của các yếu tố môi trường biển ảnh hưởng đến tầm hoạt động của các thiết bị thủy âm. Mã số: KC.09.04/11-15.*

46. Зыонг Минь Хай и сотрудники. Исследование, анализ и выбор технологических решений для проектирования прогнозной системы влияний морской среды на дальность действия гидроакустических средств. Государственная научная тема: *“Исследование влияний факторов морской среды на дальность действия гидроакустических средств” под зарегистрированным Кодом: KC.09.04/11-15. № 2.25.* Время выполнения: 2012-2015 гг. Объем: 3 тома 92 с. – (Dương Minh Hải và nhóm tác giả. Nghiên cứu phân tích lựa chọn giải pháp công nghệ thiết kế hệ thống dự báo sự ảnh hưởng của môi trường nước biển đến tầm hoạt động của các thiết bị thủy âm. *Số 2.25; gồm 3 cuốn; 92 trang; năm 2012 đến 2015. Dương Minh Hải và nhóm tác giả thực hiện đề tài khoa học cấp nhà nước: “Nghiên cứu ảnh hưởng của các yếu tố môi trường biển ảnh hưởng đến tầm hoạt động của các thiết bị thủy âm. Mã số: KC.09.04/11-15.*

47. Зыонг Минь Хай и сотрудники. Изучение и создание технологических процессов выполнения измерений для сбора данных соответствующих электромагнитным полям кораблей. Доклад по базовой научной теме в 2013 году. Г. Хайфон, СРВ, 2013 г. 43 с. – (Dương Minh Hải và nhóm tác giả. Nghiên cứu xây dựng quy trình và thực hiện đo đạc thu thập số liệu tương thích điện từ trường cho tàu. Báo cáo đề tài nghiên cứu cấp cơ sở, năm 2013. TP Hải Phòng, Việt Nam. 43 trang.).

48. Зыонг Минь Хай и сотрудники. Исследование, проектирование и реализация информационных баз между островами и берегами. Научная тема Министерства Обороны Вьетнама с зарегистрированным кодом KC09.17/06-10. Г.Хайфон, 2013 г.76 с. – (Dương Minh Hải và nhóm tác giả. Nghiên cứu, thiết kế, triển khai trạm thông tin giữa các đảo với đất liền. Đề tài nghiên cứu cấp trực thuộc Bộ. Mã số: KC09.17/06-10. TP Hải Phòng 2013/ 76 trang).

49. Зыонг Минь Хай и сотрудники. Проектирование, установка, интегрирование систем подводных радиосвязей и гидроакустических сонаров на малогабаритной подводной

лодке. Научная тема Министерства Обороны Вьетнама. Время выполнения: с 2012 – 2014 гг. Г.Хайфон. 94 с. – (Dương Minh Hải và nhóm tác giả. Thiết kế, lắp đặt, tích hợp hệ thống thông tin liên lạc ngầm, số na trên tàu ngầm cỡ nhỏ, năm 2012 đến 2014. Đề tài nghiên cứu cấp trực thuộc Bộ. TP Hải Phòng 2014. 76 trang).

50. Зыонг Минь Хай и сотрудники. Исследование, создание индикаторов угла вращения и фильтров помех для систем пассивных гидроакустических сонаров. Научная тема Министерства Обороны Вьетнама в 2012-2014 гг. Г.Хайфон, 2014 г. 85с. – (Dương Minh Hải và nhóm tác giả. Nghiên cứu chế tạo bộ chỉ báo góc quay và lọc nhiễu tín hiệu cho hệ thống số na thụ động, năm 2012 đến 2014. Đề tài nghiên cứu cấp cơ sở. TP Hải Phòng 2014. 85 trang).

51. Зыонг Минь Хай и сотрудники. Исследование современных тектонических напряженных полей и определение источников катаклизмов в районах территории шельфов Южно - восточного Вьетнама. Базовая научная тема VAST.09.02/11-12. Г.Хайфон, 2013 г. 49 с. – (Dương Minh Hải và nhóm tác giả. Nghiên cứu trường ứng suất kiến tạo hiện đại, xác định nguồn gốc các tai biến địa chất trong vùng thềm lục địa Đông Nam Việt Nam. Đề tài nghiên cứu cấp cơ sở, VAST.09.02/11-12. TP Hải Phòng 2013. 49 trang).

52. Зыонг Минь Хай и сотрудники. Исследование структур и свойств геофизических в районах конвертирующихся углеводородов по побережьям дельта Красной Реки (в районах колдобин Ханоя). Базовая научная тема. Код: VAST.HTQT.Nga.04/2012-2013. Г. Ханой, 2013 г. 102 с. – (Dương Minh Hải và nhóm tác giả. Nghiên cứu cấu trúc sâu và đặc trưng địa vật lý khu vực tích tụ hydrocarbon dải ven biển delta Sông Hồng (Vùng trũng Hà Nội). Đề tài nghiên cứu cấp cơ sở, mã số VAST.HTQT.Nga.04/2012-2013. Dương Minh Hải cùng nhóm đề tài. TP Hà Nội 2013. 102 trang).

53. Зыонг Минь Хай и сотрудники. Исследование лиманов реки Меконга и взаимодействующих процессов между ними и приливов в Юго-средней части Вьетнама. Государственная научная тема под кодом 8926/GCN-TTKCN, 2011. г. Хошимин, 2011 г. 134 с. – (Dương Minh Hải và nhóm tác giả. Nghiên cứu vùng cửa sông Mê Kông và các quá trình tương tác giữa chúng và vùng nước trời ở Nam Trung Bộ. Đề tài nghiên cứu cấp quốc gia, mã số 8926/GCN-TTKCN, 2011. Dương Minh Hải cùng nhóm đề tài. TP Hồ Chí Minh 2011. 134 trang).

54. Зыонг Минь Хай и сотрудники. Создание проекта и организация реализации строительства баз измерения и размагничивания для кораблей. Научная тема Министерства Обороны Вьетнама № 22/QD-VKT.TMv, 2012-2015. Г.Хайфон, 2015 г. 137 с. – (Dương Minh Hải và nhóm tác giả. Xây dự án và tổ chức triển khai thực hiện xây dựng trạm đo và tiêu từ cho tàu. Đề tài nghiên cứu cấp trực thuộc Bộ, số 22/QD-VKT.TMv, 2012-2015. TP Hải Phòng 2015. 137 trang).

55. Зыонг Минь Хай и сотрудники. Проектирование проекта создания гидроакустической карты. Базовая научная тема № 733/QD-VKT.TMv, 2011. Г.Хайфон, 2011 г. 43 с. – (Dương Minh Hải và nhóm tác giả. Xây dựng dự án thành lập bản đồ thủy âm. Đề tài nghiên cứu cấp cơ sở, số 733/QD-VKT.TMv, 2011. TP Hải Phòng 2011. 43 trang).

56. Зыонг Минь Хай и сотрудники. Создание проекта «Система подводная контрольная система в районе порта Камрань – Хань Хоа» с номером 5630/QD-BTL.TMv, 2007-2014. Научная тема Министерства Обороны Вьетнама. Г.Хайфон, 2014 г. 78 с. – (Dương Minh Hải và nhóm tác giả. Xây dựng dự án Hệ thống giám sát ngầm khu vực cảng Cam Ranh – Khánh Hòa, số 5630/QD-BTL.TMv, 2007-2014. Đề tài nghiên cứu cấp Bộ. TP Hải Phòng 2014. 78 trang).

57. Зыонг Минь Хай и сотрудники. Проектирование и реализация проекта “Центр технологии гидроакустики”. Научная тема Министерства Обороны Вьетнама № 12080/Tr-BTL, 2015. Г.Хайфон, 2015 г. 57 с. – (Dương Minh Hải và nhóm tác giả. Xây dựng và triển khai dự án Trung tâm công nghệ thủy âm, số 12080/Tr-BTL, 2015. Đề tài nghiên cứu cấp Bộ. TP Hải Phòng 2015. 57 trang).

58. Зыонг Минь Хай. Метод определения изоглубины 2500м и наклонности морского дна многолучевым эхолотом с использованием системы DGPS. Доклад на 5-ой Научной конференции Вьетнама «Морская Наука и Технология». Г.Хайфон, 2012 г. 10 с. – (Dương

Minh Hải. Phương pháp xác định đường đẳng sâu 2500m và độ dốc đáy biển bằng hệ thống sonar đa tia, định vị DGPS tức thời. Báo cáo khoa học tại Hội nghị khoa học và Công nghệ biển toàn quốc lần thứ V. TP Hai Phong 2012. 10 trang.

59. LIDAR- новая технология измерения с вертолета. Доклад на конференции «Морская наука и Технология» ВИМАРУ. Г.Хайфон, 2002 г. 8с. – (Dương Minh Hải. LIDAR- Công nghệ mới đo đạc biển từ máy bay. Báo cáo khoa học tại hội nghị khoa học biển của trường Đại học Hàng Hải TP Hải Phòng 2002. 8 trang).

60. Зыонг Минь Хай. Участник научно-технического и технологического военного совета Министерства Обороны СРВ, 2015 г. Dương Minh Hải. Tham gia hội đồng khoa học kỹ thuật và công nghệ Quân sự/Bộ Quốc Phòng; (năm 2015).

61. Зыонг Минь Хай. Участник группы реализации государственной научной темы «Создание системы связи высокой технологии между островами и берегами». Код КС09.17/06-10. Г.Хайфон, 2006-2010 гг. – (Dương Minh Hải. Tham gia trong nhóm triển khai đề tài khoa học cấp nhà nước: Xây dựng hệ thống thông tin công nghệ cao giữa các đảo và đất liền: Mã số: КС09.17/06-10. Năm 2006 đến 2010.

62. Зыонг Минь Хай. Заместитель заведующего государственной научной темой «Исследование влияния факторов морской среды на дальность действия гидроакустических приборов». Код КС.09.04/11-15. – (Dương Minh Hải. Phó chủ nhiệm đề tài khoa học cấp nhà nước: “Nghiên cứu ảnh hưởng của các yếu tố môi trường biển ảnh hưởng đến tâm hoạt động của các thiết bị thủy âm. Mã số: КС.09.04/11-15.

63. Зыонг Минь Хай. Участник совета оценки и приема «Перевод документаций интегрированного проекта » в 2015г. – (Dương Minh Hải. Tham gia hội đồng đánh giá và nghiệm thu “Tài liệu biên dịch thuộc dự án tích hợp”; năm 2015.

64. Зыонг Минь Хай. Участник комиссии просмотра базовых научных тем и инициатив в военно-морском техническом институте. – (Dương Minh Hải. Tham gia hội đồng khoa học xét duyệt đề tài, sáng kiến cấp Viện Kỹ thuật).

65. Болнокин В.Е., Зыонг Минь Хай, Номбре С.Б., Сторожев С.В. Нечеткая модель отражения и преломления гидроакустических волн при наклонном падении на окруженный жидкостью изотропный слой // Журнал теоретической и прикладной механики. – 2017. – № 3(60).– С. 21 – 32 .

66. Сторожев В.И., Зыонг Минь Хай Анализ модели трехслойного гидроакустического экрана с разделенными жесткой массивной пластиной неоднородными анизотропными компонентами // Современные тенденции развития математики и ее прикладные аспекты–2017: Матер. VI Междунар. научн.-практ. интернет-конф. (26 мая 2017 г.). – Донецк: ГО ВПО «ДонНУЭТ», 2017. – С. 34 – 45.

67. Болнокин В.Е., Сторожев В.И., Зыонг Минь Хай. Численно-аналитическая методика анализа модели гидроакустического экрана с внутренней перфорацией туннельными полостями // Современные тенденции развития математики и ее прикладные аспекты – 2018: Матер. VII Междунар. научн.-практ. интернет-конф. (27 мая 2018 г.). – Донецк: ГО ВПО «ДонНУЭТ», 2018. – С. 26 – 28.

68. Прийменко С.А., Номбре С.Б., Сторожев С.В., Зыонг Минь Хай. Нечетко-множественный анализ факторов неопределенности в модели перфорированных гидроакустических экранов с жестко прикрепленными герметизирующими покрытиями // Современные тенденции развития математики и ее прикладные аспекты – 2018: Матер. VII Междунар. научн.-практ. интернет-конф. (27 мая 2018 г.). – Донецк: ГО ВПО «ДонНУЭТ», 2018. – С. 37 – 39.