

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Петрова Павла Сергеевича «Математическое моделирование горизонтальной рефракции звука в трехмерных волноводах мелкого моря», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.06 – акустика

Основоположником математической теории распространения звукового поля в океанических волноводах по праву считается Хаим Лейб Пекерис. В 1948 году он впервые предложил точное описание звукового поля в двумерном однородном океаническом волноводе в виде суммы нормальных волн (мод). Безусловно такая модель звукового канала является крайне идеализированной. Хорошо известно, что океаническая среда носит существенно-нерегулярный характер, обусловленный внутренними волнами, тонкоструктурными образованиями, поверхностными волнами, внутренними течениями неровностями дна и др. Учет нерегулярностей среды распространения требует построения более точных математических моделей распространения звукового поля в океаническом волноводе. Во-первых, рассеяние звуковых волн на неоднородностях среды распространения часто приводит к существенному перераспределению энергии между модами поля (взаимодействию мод). Во-вторых, горизонтальная неоднородность среды распространения как правило приводит к значительным эффектам рефракции в горизонтальной плоскости. Учет этих эффектов требует построения более сложных трехмерных пространственно-временных математических моделей звукового поля в океанических волноводах. Решение данной проблемы имеет важное научное и практическое значение. С одной стороны, оно позволит ответить на вопрос – каким образом различные виды нерегулярности среды распространения изменяют структуру звукового поля в точке наблюдения. С другой стороны, позволит проанализировать - как нужно характеристики излучения, чтобы принимаемый сигнал имел желаемые параметры. Хотя к настоящему моменту по данной проблеме имеется большое количество как теоретических, так и экспериментальных исследований, эта проблема остается актуальной из-за своей сложности и многогранности. Во-первых, данная ситуация связана с многообразием видов нерегулярностей океанических волноводов. Во-вторых, она обусловлена сложностью математического описания звукового поля в реальной океанической среде. В связи с этим теоретический анализ эффектов горизонтальной рефракции звука на неоднородностях батиметрии в мелководных океанических волноводах, учитывающий реальную океаническую обстановку, представленный в диссертации Петрова П.С. является весьма актуальным в настоящее время.

В диссертации П.С. Петрова разработаны и верифицированы новые подходы моделирования горизонтальной рефракции в реалистических трехмерных океанических волноводах, нерегулярный характер которых обусловлен рельефом дна, представлены результаты детального исследования физико-математических принципов горизонтальной рефракции звука в мелководной океанической среде, выполнен сравнительный анализ аналитических решений модельных задач с результатами численного моделирования.

Диссертационная работа соискателя состоит из введения, шести содержательных глав и заключения общим объемом 347 страниц. Список цитируемой литературы составляет 256 наименований.

Во введении сформулированы цели и задачи исследования. Обоснована актуальность, научная новизна и практическая значимость работы. Описаны методы исследования. Представлены положения, выносимые на защиту.

Первая глава содержит математическую постановку задач распространения звука в мелком море. В ней рассмотрены волновое уравнение, уравнение Гельмгольца и система динамических уравнений теории упругости. Сформулированы начальные и краевые условия, соответствующие гидроакустическому волноводу на океаническом шельфе. Проанализировано решение уравнения Гельмгольца в клиновидном прибрежном волноводе.

Во второй главе разработан и апробирован новый метод моделирования распространения импульсных сигналов в трехмерных гидроакустических волноводах. Предложенный соискателем метод основывается на асимптотическом решении в рамках лучевой теории с использованием модифицированного канонического оператора Маслова. В рамках предложенного подхода получено решение как для регулярной и фокальной точки семейства лучей. Предложенный метод применим для волнового уравнения с условиями Дирихле или Неймана. Приведены результаты расчета распространения импульсных сигналов для акустической трассы в прибрежном клине, ориентированной параллельно ребру клина. На основе теории инвариантов Вестона дана интерпретация геометрии лучей. Предложенные асимптотики могут являться эффективными для моделирования дальнего (сотни километров) и сверхдальнего (тысячи километров) распространения импульсных акустических сигналов в сложных волноводах, включающих шельфовый и глубоководный участки в многомодовом режиме (для частот в несколько сотен Герц) и особенно в условиях, когда высшими модами можно пренебречь ввиду их затухания, связанного с взаимодействием с дном.

Третья глава диссертации посвящена теоретическому описанию звукового поля в трехмерных задачах акустики с учетом эффектов горизонтальной рефракции. Задача решается соискателем в рамках классического метода математической физики – метода Фурье разделения переменных. В рамках такого подхода удастся разделить факторы, описывающие

вертикальную и горизонтальную структуру звукового поля. В работе изложен вывод уравнения горизонтальной рефракции, когда взаимодействием между вертикальными модами из-за рассеяния можно пренебречь. Уравнения горизонтальной рефракции проанализированы для двух случаев, в которых решение уравнения допускает аналитическое представление. В первом случае рассматривается задача распространения звука в волноводе мелкого моря с неоднородностью дна в виде подводного каньона. Результатом проявления горизонтальной рефракции в этой ситуации является фокусировка энергии звукового поля над каньоном, а распространение в горизонтальной плоскости можно считать волноводным. Во втором случае рассмотрены эффекты, связанные с горизонтальной рефракцией звука в окрестности семейства искривленных изобат. В этой ситуации уравнение горизонтальной рефракции допускает частные решения специального вида, подобные по своим свойствам модам шепчущей галереи. Построена ВКБ-теория этих волн.

В четвертой главе представлен вывод узкоугольного модового параболического уравнения. Получены аналитические решения узкоугольного малоуглового параболического уравнения получены с помощью методов теории групп и алгебр Ли. В главе построены аналитические решения задачи распространения звука в клине и вдоль гребня подводного хребта. Представлен сравнительный анализ результатов расчета с результатами, полученными с применением метода виртуальных источников, демонстрирует качественное и количественное сходство. Разработана и апробирована новая методика моделирования акустических полей в трехмерных нерегулярных волноводах мелкого моря, основанная на численном решении псевдодифференциальных модовых параболических уравнений. В качестве примера рассмотрена задача о волнах шепчущей галереи, распространяющихся вдоль криволинейной изобаты.

В пятой главе представлен вывод итеративных параболических уравнений (ИПУ). Рассматривается методика расчета акустических полей в неоднородных волноводах мелкого моря с использованием ИПУ. Формулируется и доказывается теорема об асимптотическом сохранении потока энергии системой ИПУ. Выводятся граничные условия прозрачности (ГУП) для системы ИПУ, которые являются прямым обобщением ГУП Баскакова-Попова для уравнения Шредингера. Предлагается алгоритм решения системы ИПУ с ГУП и условиями на наклонных границах раздела. Доказана его безусловная устойчивость. Проведены численные эксперименты на предмет проверки точности расчетов волновых полей с использованием разработанного алгоритма.

В шестой главе проанализированы эффекты горизонтальной рефракции при распространении низкочастотного звука вдоль трассы, ориентированной поперек наклона дна в мелком море. Рассмотрен натуральный эксперимент, в ходе которого исследовалось

распространение звука на трассе протяженностью около 136 км, ориентированной вдоль кромки континентального шельфа Японского моря. Проанализированы импульсные характеристики принимаемых сигналов и оценены их эффективные скорости распространения, соответствующие усредненной по трассе групповой скорости первой моды. С использованием широкоугольных параболических уравнений промоделирована модовая структура поля. Показано, что для трассы протяженностью 136 км в случае распространения вдоль кромки шельфа для приемлемого уровня точности необходимо учитывать горизонтальную рефракцию звука на наклонном дне.

В заключение представлен итоговый анализ полученных диссертационной работе результатов. Проведена оценка значимости разработанных соискателем методов, позволяющих учитывать эффекты горизонтальной рефракции, в развитие теории математического описания звукового поля в трехмерных океанических волноводах.

Из наиболее значимых результатов диссертационной работы соискателя можно отметить следующие.

1. Предложено обобщение лучевого метода моделирования распространения импульсных сигналов точечного источника звука в волноводах мелкого моря с неоднородной батиметрией и идеальными границами, позволяющее выполнять расчеты временных рядов акустического давления как в регулярных, так и в фокальных точках семейства лучей.

2. Для моделей волноводов мелкого моря с чашеобразным дном и с подводным каньоном установлены достаточные условия, при которых горизонтальная рефракция приводит к формированию модовой структуры звукового поля в горизонтальной плоскости и локализации акустической энергии в окрестности семейства изобат, определяющих указанные неоднородности батиметрии. Выполнен качественный и количественный анализ интерференционной картины, формируемой горизонтальными модами в этих случаях.

3. В адиабатическом приближении построены аналитические решения задач распространения звука в мелководных акваториях с трехмерными неоднородностями батиметрии, описываемыми квадратичными параметрическими функциями. На примере волновода с подводным хребтом выполнен качественный анализ интерференционной картины в горизонтальной плоскости.

4. Разработана и апробирована путем решения тестовых задач новая методика моделирования акустических полей в трехмерных нерегулярных волноводах мелкого моря, основанная на численном решении псевдодифференциальных модовых параболических уравнений в области с искусственными границами в адиабатическом приближении. Данная методика позволяет выполнять расчет акустических полей с существенно более высокой скоростью, чем при использовании трехмерных параболических уравнений.

5. Предложен и теоретически обоснован новый метод расчета волновых полей в мелком море, основанный на численном решении итеративных параболических уравнений с граничными условиями прозрачности. Доказана корректность начально-краевых задач для этих уравнений, а также безусловная устойчивость разработанной численной схемы их решения.

Научная новизна работы обусловлена тем, что в ней разработан метод решения задач подводной акустики, основанный на решении псевдодифференциальных модовых параболических уравнений в криволинейных координатах; получены новые классы приближенных аналитических решений трехмерных задач распространения звука в волноводах мелкого моря с неоднородным рельефом дна; описан эффект формирования волновода шепчущей галереи в окрестности семейства криволинейных изобат; описано изменение характера выпуклости волновых фронтов на некотором удалении от источника; получено аналитическое решение уравнения горизонтальной рефракции в мелком море с подводным каньоном.

Практическая значимость работы обусловлена тем, что в ней разработано обобщение лучевого метода для решения трехмерных задач акустики океана с возможностью расчета временных рядов импульсных сигналов в случаях, когда приемник находится в фокальной точке семейства лучей; разработана теория итеративных параболических аппроксимаций для моделирования распространения звука в океане; разработаны граничные условия прозрачности для итеративных параболических уравнений; разработана численная схема для решения итеративных параболических уравнений с граничными условиями прозрачности; исследовано влияние горизонтальной рефракции, обусловленной неоднородностями батиметрии, на точность решения задач акустической дальнометрии. Предложенные в работе методы расчета звуковых полей могут быть реализованы для решения различных практических задач, где требуется моделирование на обширных реальных акваториях с значительными вариациями рельефа дна. Результаты полученные соискателем могут быть использованы в организациях, проводящих прикладные гидроакустические исследования: АО «Концерн «Океанприбор»; АО "Концерн "Морское подводное оружие - Гидроприбор"; ФГУП Акустический Институт им. Н.Н. Андреева; Институте прикладной физики РАН; ИОФ им. А.М. Прохорова РАН; ИО им. П.П. Ширшова РАН; ТОИ им. В.И. Ильичева ДВО РАН; Московский госуниверситет им. М.В. Ломоносова; С.-Петербургский государственный морской технический университет; Воронежский госуниверситет.

Обоснованность и достоверность полученных результатов, научных положений и выводов подтверждаются согласием результатов численного моделирования, аналитических решений и данных натурного эксперимента. Материалы диссертации опубликованы в 35

печатных работах, из них 24 статьи в рецензируемых журналах и 11 статей в сборниках трудов конференций. Издания, в которых опубликованы все указанные выше работы, индексируются в международных базах данных Scopus и Web of Science. Результаты диссертационной работы в полной мере отражены в публикациях автора с коллегами, а автореферат диссертации соответствует содержанию работы.

В качестве замечаний можно указать следующие моменты.

1. Интерференционная структура широкополосного гидроакустического сигнала в пространственно-частотной области является одной из наиболее стабильной и информативной характеристикой звукового поля. Акустическая интерферометрия - активно развиваемое направление в океанической акустике. В связи с этим в работе следовало бы уделить внимание изучению влияния горизонтальной рефракции на интерференционную структуру звукового поля в океаническом волноводе. Тем более, что разработанные соискателем математические модели звукового поля в трехмерном гидроакустическом волноводе позволяют провести такое исследование.
2. Работа соискателя приобрела бы еще большую научную и практическую ценность если бы автору удалось бы в рамках предложенных им математических моделей звукового поля в трехмерных гидроакустических волноводах учитывать не только горизонтальную рефракцию, но и многократное рассеяние звукового поля на неоднородностях среды распространения приводящее к взаимодействию вертикальных мод.
3. В диссертационной работе детально анализируются эффекты, связанные с горизонтальной рефракцией звукового поля. При этом предполагается точное знание акустических параметров океанического волновода, в частности его батиметрии. Как известно, океанический волновод характеризуется значительной пространственно-временной изменчивостью параметров. В связи с этим точное знание параметров океанического волновода в исследуемой акватории затруднительно, а в ряде практических приложений и невозможно. В этой ситуации крайне актуален сравнительный анализ акустических эффектов, обусловленных горизонтальной рефракцией с погрешностью математической модели звукового поля из-за неточности знаний параметров среды распространения.

Также имеются некоторые замечания в оформлении диссертации. При прочтении были замечены незначительные опечатки. Расположение ряда рисунков не соответствует упоминанию их в тексте. В заключении работы следовало бы включить полный список результатов диссертации, которые автор распределил по главам. Это несколько облегчило бы восприятие материала в целом.

Отмеченные недостатки не затрагивают основного содержания работы и не снижают общую высокую оценку диссертации. Диссертационное исследование Павла Сергеевича Петрова «Математическое моделирование горизонтальной рефракции звука в трехмерных волноводах мелкого моря» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, выполненную на высоком уровне обладающую научной новизной, теоретической и практической значимостью, достоверностью представленных результатов. Внедрение разработанных в ней новых математических методов решения трехмерных задач в нерегулярных океанических мелководных волноводах вносит существенный вклад в развитие современной акустики океана. Диссертационная работа соискателя соответствует требованиям п. 24 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук. Считаю, что автор диссертационной работы безусловно заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.06 – акустика.

Заведующий кафедрой математической физики и информационных технологий физического факультета Воронежского государственного университета, д-р. физ.-мат. наук

Переселков С.А.

