

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева
Дальневосточного отделения Российской академии наук

ОДОБРЕНО
на заседании Ученого совета
ТОИ ДВО РАН, протокол № 12
«21» ноября 2019 г.

УТВЕРЖДАЮ
Директор ТОИ ДВО РАН
В.Б. Лобанов
«02» декабря 2019 г.



РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ (РПУД)
«МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ПОДВОДНОЙ АКУСТИКЕ»

Направление подготовки
03.06.01 **Физика и астрономия (Теоретическая физика)**
Форма подготовки – **очная**

Курс 3, семестры 5, 6
Лекции 54 час.
Практические занятия 18 час.
Лабораторные работы
Всего часов аудиторной нагрузки 72 час.
Самостоятельная работа 72 час.
Контрольные работы (количество)
Курсовая работа/курсовой проект
Зачет 6 семестр
Экзамен

Программа составлена в соответствии с требованиями Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки 03.06.01 Физика и астрономия (уровень подготовки кадров высшей квалификации), утвержденного приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 30.07.2014 № 867.

Программа рассмотрена и одобрена на заседании Ученого совета ТОИ ДВО РАН, протокол № 12 от «21» ноября 2019 г.

Ученый секретарь
к.г.н.



Н.И. Савельева

Составитель: к.ф.-м.н., зав. лабораторией геофизической гидродинамики
П.С. Петров

I. Рабочая программа пересмотрена на заседании Ученого совета

Протокол от « _____ » _____ 20__ г. № _____

Ученый секретарь _____
подпись *И.О. Фамилия*

II. Рабочая программа пересмотрена на заседании Ученого совета

Протокол от « _____ » _____ 20__ г. № _____

Ученый секретарь _____
подпись *И.О. Фамилия*

АННОТАЦИЯ

Дисциплина «Математические методы в подводной акустике» предназначена для аспирантов, обучающихся по образовательной программе «Теоретическая физика» и входит в вариативную часть учебного плана.

При разработке рабочей программы учебной дисциплины использованы Федеральный государственный образовательный стандарт высшего образования (уровень подготовки кадров высшей квалификации) по направлению подготовки 03.06.01 «Физика и астрономия» (уровень подготовки кадров высшей квалификации), утвержденного приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 30.07.2014 г. № 867, учебный план подготовки аспирантов по профилю «Теоретическая физика».

Цель – подготовить аспирантов к применению современных математических методов при проведении теоретических исследований по вопросам распространения волн в неоднородных средах, в частности, в акустике океана, а также к защите научно-квалификационной работы (диссертации) и преподаванию в учреждениях высшего профессионального образования.

Задачи:

- ознакомить аспирантов с обширным кругом современных математических методов, применяемых при решении задач распространения волн в неоднородных средах, в частности, при моделировании распространения звука в океане;
- на основании теоретической и практической подготовки аспирантов сформировать навыки к самостоятельной научной и педагогической деятельности.

Компетенции выпускника, формируемые в результате изучения дисциплины:

Универсальные компетенции:

Способность к критическому анализу и оценке современных научных

достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях (УК-1).

Готовность участвовать в работе российских и международных исследовательских коллективов по решению научных и научно-образовательных задач (УК-3).

Способность планировать и решать задачи собственного профессионального и личностного развития (УК-5).

Общепрофессиональные компетенции:

Способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в области теоретической физики с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий (ОПК-1).

Готовность к преподавательской деятельности по основным образовательным программам высшего образования (ОПК-2).

Профессиональные компетенции:

Владение современными методами научных исследований в области теоретической физики, в том числе с использованием новейших информационно-коммуникационных технологий (ПК-2).

Способность обобщать и использовать результаты научных исследований для решения практических задач (ПК-6).

Требования к уровню усвоения содержания дисциплины.

Аспиранты должны приобрести следующие знания и умения.

Знать:

- основные фундаментальные методы и подходы к решению задач распространения волн в неоднородных средах;
- современное состояние и перспективы развития исследований в области моделирования распространения волн, в частности, в акустике океана;
- основные научные проблемы в области математического моделирования распространения звука в океане.

Уметь:

- переводить физические задачи, связанные с распространением звуковых волн в океане на язык математики, формулировать их в виде начально-краевых задач для уравнений в частных производных;
- определять в указанных физических задачах малые и большие параметры и правильным образом применять асимптотические методы для упрощения задач в их математической формулировке;
- решать задачи, приведенные к корректной математической формулировке, используя асимптотические, численные и аналитические методы.

Владеть:

- навыком приведения физических задач, связанных с распространением волн в неоднородных средах, к корректной математической формулировке;
- основными математическими методами, употребительными для решения этих задач на практике (метод разделения переменных, метод параболического уравнения, методы операторного исчисления, численные методы);
- навыками программной реализации численного решения задач распространения линейных волн в неоднородных средах.

Интерактивные формы обучения составляют 72 часа и включают в себя 54 часа лекционных занятий и 18 часов практических занятий.

I. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ КУРСА

Лекционные занятия – 54 часа.

МОДУЛЬ 1. Основные прямые задачи акустики океана и их математическая постановка (6 час.)

Тема 1. Акустика океана. Основные уравнения и параметры среды (2 час.)

Основные практические задачи вычислительной подводной акустики. Волновое уравнение. Уравнение Гельмгольца. Скорость звука, плотность. Источник звука как вынуждающий член в уравнениях. Затухание. Волновое уравнение с вязкоупругим затуханием.

Тема 2. Граничные условия, краевые и начально-краевые задачи (2 час.)

Краевая задача для уравнения Гельмгольца. Начально-краевая задача для волнового уравнения. Понятие о корректности начально-краевых задач. Существование и единственность решения. Особые точки на примере задачи с клином. Условие Мейкснера. Функция Грина.

Тема 3. Параметры среды и характерные пространственные масштабы в акустике океана (2 час.)

Скорость звука и плотность как основные параметры в акустике океана. Затухание звука в воде и дне. Использование натуральных данных о гидрофизических полях при моделировании распространения звука. Расчет скорости звука и плотности по данным о температуре и солености.

МОДУЛЬ 2. Метод разделения переменных и метод нормальных волн (12 час.)

Тема 1. Метод разделения переменных для уравнений в частных производных (2 час.)

Разделение переменных в волновое уравнении и уравнении Гельмгольца. Симметрии волноводов мелкого моря. Приближение несвязанных азимутов. Разделение переменных в декартовых координатах при наличии трансляционной симметрии. Разделение переменных в цилиндрических и полярных координатах при наличии вращательной симметрии.

Тема 2. Метод нормальных волн в подводной акустике: случай слоистой среды (2 час.)

Разделение переменных в уравнении Гельмгольца. Задача Штурма-Лиувилля для горизонтальных волновых чисел и модовых функций. Аналитическое решение в простейших случаях. Дисперсионное соотношение. Волновод Пекериса.

Тема 3. Метод нормальных волн в подводной акустике: двумерный неоднородный волновод (2 час.)

Метод нормальных волн в случае плавной зависимости параметров волновода от расстояния вдоль трассы. Система уравнения для модовых амплитуд в условиях взаимодействия мод. Адиабатическое приближение. Условие применимости адиабатического приближения.

Тема 3. Метод нормальных волн в подводной акустике: трехмерных акустический волновод (2 час.)

Уравнение горизонтальное рефракции и случаи, когда оно допускает аналитическое решение. Система уравнений для модовых амплитуд в случае волновода с трехмерными неоднородностями.

Тема 4. Метод нормальных волн в подводной акустике: трехмерных акустический волновод (6 час.)

Численные методы решения задачи Штурма-Лиувилля, расчет волновых чисел и модовых функций. Метод стрельбы. Метод конечных разностей. Сведение задачи Штурма-Лиувилля к матричной спектральной задаче. Программа Kraken. Программа Cambala. Программа ac_modes.

МОДУЛЬ 3. Метод параболического уравнения (16 час.)

Тема 1. Основы метода параболического уравнения (2 час.)

Параболическое уравнение Леонтовича-Фока. Параболическое уравнение Тапперта. Иерархия параболических уравнений, получаемых методов многих масштабов.

Тема 2. Широкоугольные параболические уравнения (4 час.)

Псевдодифференциальное параболическое уравнение. Понятие о псевдодифференциальных операторах. Аппроксимации Паде. Применение аппроксимаций Паде для вычисления псевдодифференциальных операторов. Широкоугольные параболические уравнения.

Тема 3. Начально-краевые задачи для параболических уравнений (2 час.)

Начальные условия для параболических уравнений. Краевые условия для параболических уравнений. Существование и единственность решений краевых задач для параболических уравнений.

Тема 4. Численное решение параболических уравнений (4 час.)

Метод Крэнка-Николсон. Решение систем линейных алгебраических уравнений с трехдиагональной матрицей методов прогонки. Понятие о методах SSF, SSP и ETD.

Тема 5. Программы RAM/RAMs, организация расчетов (4 час.)

Программный комплекс RAM/RAMs. Оболочка для ввода данных в комплекс RAM/RAMs. Организация расчетов с помощью RAM/RAMs.

МОДУЛЬ 4. Геометрическая акустика (14 час.)

Тема 1. Лучевая теория для уравнения Гельмгольца (2 час.)

Высокочастотные асимптотики волновых полей. Уравнение Гамильтона-Якоби. Система Гамильтона. Бихарактеристики. Начальные условия для уравнений Гамильтона.

Тема 2. Приближение ВКБ (2 час.)

ВКБ-представление волновых полей. Условия квантования. Примеры.

Тема 3. Гауссовы пучки (2 час.)

Метод суммирования гауссовых пучков. Гауссов пучок как решение параболического уравнения вдоль луча. Суммирование гауссовых пучков для расчета волновых полей.

Тема 4. Гауссовы пучки (4 час.)

Лучевая теория во временной области. Понятие о каноническом операторе Маслова. Асимптотика решения волнового уравнения с локализованным начальным условием. Функция Секержа.

Тема 5. Программы Bellhop и TRACEO (4 час.)

Использование программных комплексов Bellhop и TRACEO для расчета волновых полей. Структура входных и выходных файлов. Организация расчетов.

МОДУЛЬ 5. Общие вопросы моделирования распространения волн (6 час.)

Тема 1. Условия прозрачной границы и совершенные поглощающие слои (2 час.)

Волноводы с открытыми границами в акустике океана. Теория PML. Условия прозрачной границы для параболических уравнений и волновых уравнений.

Тема 2. Моделирование широкополосных сигналов (4 час.)

Импульсная характеристика волновода. Распространение импульсных сигналов. Межмодовая и внутримодовая дисперсии. Групповые скорости. Фурье-синтез решения волнового уравнения из решений уравнения Гельмгольца.

II. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ПРАКТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ КУРСА

Практические занятия – 18 часов.

МОДУЛЬ. Расчет звуковых полей в волноводах мелкого моря (18 час.)

Тема 1. Решение акустической спектральной задачи (4 час.)

Расчет поля по методу нормальных волн в волноводах мелкого моря начинается с решения акустической спектральной задачи. На первом практическом занятии обучающиеся учатся решать акустическую спектральную задачу с помощью аналитических и численных методов.

Тема 2. Расчет звукового поля по методу нормальных волн (2 час.)

Расчет звуковых полей по методу нормальных волн представляет собой одну из классических задач теоретической подводной акустики. В настоящей работе он выполняется для простейшего случая акустического волновода, однородного в горизонтальных направлениях. При этом обучающиеся опираются на результаты выполнения предыдущей работы – вычисленные горизонтальные волновые числа и модовые функции.

Тема 3. Метод параболического уравнения в акустике (6 час.)

Теоретические предпосылки: одним из наиболее важных современных инструментов вычислительной акустики океана является метод широкоугольных параболических уравнений. Данная практическая работа направлена на освоение данного метода и его применение к расчету двумерных и трехмерных акустических полей в океане (во втором случае используется модовое параболическое уравнение).

Тема 4. Расчет лучевых траекторий (6 час.)

Исследование геометрии лучей является важным инструментом качественного анализа волновых полей в различных физических задачах. При этом могут рассматриваться как лучевые траектории в вертикальном сечении океанического волновода (например, в приближении несвязанных азимутов), так и рефракция горизонтальных лучей, соответствующих

отдельным вертикальным модам. В данной работе обучающиеся знакомятся с системой Гамильтона, проекции решений которой на координатное пространство суть лучи, соответствующие рассматриваемому волноводу полю, и строят решения этой системы путем ее численного интегрирования (с помощью метода Эйлера или метода Рунге-Кутты).

III. КОНТРОЛЬ ДОСТИЖЕНИЯ ЦЕЛЕЙ КУРСА

Фонд оценочных средств прилагается.

IV. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Основная литература

1. Jensen F.B., Porter M.B., Kuperman W.A., Schmidt H. Computational ocean acoustics, Springer, New-York et al. 2011. 794 p.
2. Katsnelson B.G., Petnikov V.G., Lynch J.F. Fundamentals of Shallow Water Acoustics, Springer, New-York et al. 2012. 540 p.
3. Burridge R., Weinberg H. Horizontal rays and vertical modes // В сборнике «Wave propagation and underwater acoustics» (Springer). 1977. P. 86-152.
4. Trofimov M.Y., Zakharenko A.D., Kozitskiy S.B. Mode Gaussian beam tracing // Computer Physics Communications. 2016. V. 207. P. 179-185.
5. Weston D.E. Horizontal Refraction in a Three-dimensional Medium of Variable Stratification // Proceedings of the Physical Society. 1961. V. 78, No. 1. P. 46-52.