

**Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)»**

**УТВЕРЖДЕНО**

**Проректор по учебной работе и  
довузовской подготовке**

**А.А. Воронов**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Численный расчет волновых процессов
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра информатики и вычислительной математики
<b>курс:</b>	2
<b>квалификация:</b>	бакалавр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 4 (весенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 0 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 60 час.

Самостоятельная работа: 120 час.

Всего часов: 180, всего зач. ед.: 4

Количество контрольных работ, заданий: 4

Программу составил: В.И. Голубев, канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент

Программа обсуждена на заседании кафедры информатики и вычислительной математики 27.01.2021

## Аннотация

Курс направлен на ознакомление студентов с основами численных методов. Основной упор будет сделан на гиперболические уравнения и системы. Студенты познакомятся с теоретическими основами сеточно-характеристических численных методов, понятиями аппроксимации и устойчивости разностной задачи. Будут рассмотрены решения волновых уравнений, описывающих динамическое поведение акустических, упругих, анизотропных и пористых сред. Внимание будет уделено получению практических навыков реализации вычислительных методов. В ходе курса необходимо будет выполнить курсовой проект, заключающийся в разработке прикладного программного обеспечения на языке Python и/или C++.

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

Целью дисциплины является знакомство студентов с основами численных методов. Основной упор будет сделан на гиперболические уравнения и системы. Студенты познакомятся с теоретическими основами сеточно-характеристических численных методов, понятиями аппроксимации и устойчивости разностной задачи. Будут рассмотрены решения волновых уравнений, описывающих динамическое поведение акустических, упругих, анизотропных и пористых сред. Внимание будет уделено получению практических навыков реализации вычислительных методов. В ходе курса необходимо будет выполнить курсовой проект, заключающийся в разработке прикладного программного обеспечения на языке Python и/или C++.

### Задачи дисциплины

- формирование у обучающихся знаний по численным методам, применяемым для решения гиперболических систем уравнений;
- формирование у обучающихся знаний по аналитическому исследованию гиперболических систем уравнений;
- формирование умений и навыков реализации расчётных алгоритмов на языках Python/C++.

## 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач	УК-1.1 Анализирует задачу, выделяя этапы ее решения, действия по решению задачи
	УК-1.2 Находит, критически анализирует и выбирает информацию, необходимую для решения поставленной задачи
	УК-1.3 Рассматривает различные варианты решения задачи, оценивает их преимущества и недостатки
	УК-1.4 Грамотно, логично, аргументированно формирует собственные суждения и оценки
	УК-1.5 Определяет и оценивает практические последствия возможных вариантов решения задачи
ОПК-1 Способен применять фундаментальные знания, полученные в области физико-математических и (или) естественных наук, и использовать их в профессиональной деятельности	ОПК-1.1 Способен анализировать поставленную задачу, намечать пути ее решения
	ОПК-1.2 Способен строить математические модели, производить количественные расчеты и оценки
	ОПК-1.3 Способен определять границы применимости полученных результатов
ОПК-2 Способен использовать современные информационные технологии и программные средства при решении задач профессиональной деятельности, соблюдая требования информационной безопасности	ОПК-2.1 Способен применять современные вычислительную технику и сервисы сети Интернет в области (сфере) профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Знает и умеет применять численные математические методы и прикладное программное обеспечение для решения научных задач в профессиональной области

ОПК-4 Способен осуществлять сбор и обработку научно-технической и (или) технологической информации для решения фундаментальных и прикладных задач	ОПК-4.1 Владеет методами научного поиска и интеллектуального анализа информации при решении задач профессиональной деятельности
	ОПК-4.2 Знает основные источники научно-технической и (или) технологической информации в области профессиональной деятельности
ОПК-5 Способен участвовать в проведении фундаментальных и прикладных исследований и разработок, самостоятельно осваивать новые теоретические, в том числе, математические методы исследований, и работать на современной экспериментальной научно-исследовательской, измерительно-аналитической и технологической аппаратуре	ОПК-5.1 Способен решать поставленные задачи в области теоретических и экспериментальных исследований и разработок
	ОПК-5.2 Обладает способностью к освоению новых знаний на основе изучения литературы, научных статей и других источников
	ОПК-5.3 Способен к профессиональной эксплуатации современной экспериментальной научно-исследовательской (измерительно-аналитической и технологической) аппаратуры
ПК-1 Способен планировать и проводить научные эксперименты (в избранной предметной области) и (или) теоретические (аналитические и имитационные) исследования	ПК-1.3 Владеет культурой постановки научной задачи и моделирования естественнонаучных объектов и систем
	ПК-1.4 Умеет строить математические модели для описания и исследования процессов и явлений в соответствующих научных областях
	ПК-1.6 Знает основные правила поведения и работы в современной научной лаборатории
	ПК-1.7 Способен оценивать требуемые ресурсы (материальные и временные) для планирования и проведения научного эксперимента
	ПК-1.8 Владеет навыками работы с современными языками программирования и программными пакетами для научных расчетов
ПК-2 Способен анализировать полученные в ходе научно-исследовательской работы данные и делать научные выводы (заключения)	ПК-2.1 Владеет методами статистической обработки и анализа научных данных
	ПК-2.2 Умеет находить ключевые параметры, определяющие изучаемое явление, и производить численные оценки по порядку величины
ПК-3 Способен выбирать и применять подходящее оборудование, инструменты и методы исследований для решения задач в избранной предметной области	ПК-3.1 Умеет производить оценку точности численных методов, используемых на ЭВМ, вычислительной сложности используемых алгоритмов и объема требуемых вычислительных ресурсов
	ПК-3.2 Знает области и критерии применимости используемых теоретических подходов и умение оценивать точность приближенных аналитических методов вычислений
ПК-4 Способен критически оценивать применимость используемых методик и методов	ПК-4.3 Способен обосновать причинно-следственные отношения используемых понятий и моделей

### 3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- фундаментальные основы построения численных методов решения гиперболических систем уравнений;
- понятия разностной задачи, аппроксимации, устойчивости, сходимости разностных схем;
- определяющие системы уравнений акустики, упругости, анизотропной упругости, двухконтинуальных систем.

уметь:

- аналитически исследовать гиперболические уравнения и системы уравнений;
- находить собственные числа и собственные вектора матриц аналитическими и численными методами;
- исследовать гиперболические уравнения и системы уравнений на аппроксимацию и устойчивость;
- строить структурные расчётные сетки;
- реализовывать на языке Python/C++ схемы на расширенном шаблоне;
- реализовывать на языке Python/C++ схемы на компактном шаблоне.

владеть:

- теоретическими и практическими знаниями о гиперболических системах уравнений и численных методах их решения.

#### 4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

##### 4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Основы численных методов			6	12
2	Математические модели динамического поведения сред			6	12
3	Простейшее гиперболическое уравнение переноса			6	12
4	Сеточно-характеристический метод			6	12
5	Многомерные задачи			6	12
6	Акустическая среда			6	12
7	Изотропная упругая среда			6	12
8	Анизотропная упругая среда			6	12
9	Пористая насыщенная среда			6	12
10	Контакт между средами			6	12
Итого часов				60	120
Подготовка к экзамену		0 час.			
Общая трудоёмкость		180 час., 4 зач.ед.			

##### 4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

Семестр: 4 (Весенний)

###### 1. Основы численных методов

Дифференциальная задача, разностная задача, понятия аппроксимации, устойчивости, сходимости. Численное исследование порядка сходимости схемы.

###### 2. Математические модели динамического поведения сред

Определяющие системы уравнений для акустического, линейно-упругого, анизотропного и пористого/насыщенного приближений.

### 3. Простейшее гиперболическое уравнение переноса

Вид уравнения, аналитическое решение, область зависимости, граничное и начальное условия.

### 4. Сеточно-характеристический метод

История развития, прямой и обратный методы, понятие характеристик, инвариантов Римана.

### 5. Многомерные задачи

Метод расщепления по пространственным направлениям, метод расщепления по физическим процессам, структурные и неструктурные расчётные сетки.

### 6. Акустическая среда

Каноническая запись для акустической среды, вид матриц системы, количество и значения собственных чисел и собственных векторов задачи.

### 7. Изотропная упругая среда

Каноническая запись для изотропной упругой среды, вид матриц системы, количество и значения собственных чисел и собственных векторов задачи.

### 8. Анизотропная упругая среда

Каноническая запись для анизотропной упругой среды, вид матриц системы, количество и значения собственных чисел и собственных векторов задачи.

### 9. Пористая насыщенная среда

Каноническая запись для пористой насыщенной среды, вид матриц системы, количество и значения собственных чисел и собственных векторов задачи.

### 10. Контакт между средами

Явное выделение, количество условий на контакте, реализация граничных корректоров.

## 5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

Персональный компьютер или ноутбук с установленным компилятором Python/C++ и сторонними свободно распространяемыми библиотеками.

## 6. Перечень рекомендуемой литературы

### Основная литература

1. Язык программирования C++ [Текст] = The C++ Programming Language, [учеб. пособие для вузов] / Бьерн Страуструп ; пер. с англ. под ред. Н. Н. Мартынова. - М., БИНОМ, 2017
2. Программирование на Python 3 : Подробное руководство [Текст] = Programming in Python 3 : [учеб. пособие для вузов] / М. Саммерфилд; пер. с англ. А. Киселева. — СПб : Символ-Плюс, 2015. — 608 с.

### Дополнительная литература

1. Лекции по вычислительной математике [Текст] / И. Б. Петров, А. И. Лобанов - М. БИНОМ. Лаб. знаний ; Интернет-Университет Информационных Технологий, 2017

## **7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)**

Не используются

## **8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)**

На лабораторных работах используются мультимедийные технологии, включая демонстрацию презентаций.

В процессе самостоятельной работы обучающихся возможно использование таких программных средств, как Microsoft Visual Studio, Jupiter Notebooks, Anaconda, Wolfram Mathematica и др.

## **9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)**

Обучающийся курсу должен освоить основы численных методов, математические модели динамического поведения различных сред, сеточно-характеристический численный метод. Он должен научиться применять полученные знания на практике, реализовывать расчётные алгоритмы в виде программ на языке Python/C++. Освоение курса не сводится только к посещению занятий. Основой успешного прохождения курса является самостоятельная работа студента, которая включает в себя:

- проработку примеров программ и аналитических выкладок с занятий;
- выполнение домашних заданий;
- изучение дополнительных материалов по монографиям, статьям и справочникам.

Руководство и контроль за самостоятельной работой студента осуществляется в форме индивидуальных консультаций.

Показателем владения материалом служит умение решать вычислительные задачи. Для формирования умения применять теоретические знания на практике студенту необходимо самостоятельно решать задачи, писать программы на Python/C++. При решении задач стоит акцентировать внимание на качестве написанного кода и его наглядности, полном понимании всех этапов решения задачи. Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями к преподавателю.

Выполнение домашних заданий является обязательным. Домашние задания могут быть частично или полностью заменены по решению преподавателя на несколько курсовых проектов. Способ оформления и отправки работ сообщается преподавателем дополнительно.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

**по направлению:** Прикладные математика и физика  
**профиль подготовки:** Общая и прикладная физика  
Физтех-школа физики и исследований им. Ландау  
кафедра информатики и вычислительной математики  
**курс:** 2  
**квалификация:** бакалавр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 4 (весенний) - Дифференцированный зачет

**Разработчик:** В.И. Голубев, канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач	УК-1.1 Анализирует задачу, выделяя этапы ее решения, действия по решению задачи
	УК-1.2 Находит, критически анализирует и выбирает информацию, необходимую для решения поставленной задачи
	УК-1.3 Рассматривает различные варианты решения задачи, оценивает их преимущества и недостатки
	УК-1.4 Грамотно, логично, аргументированно формирует собственные суждения и оценки
	УК-1.5 Определяет и оценивает практические последствия возможных вариантов решения задачи
ОПК-1 Способен применять фундаментальные знания, полученные в области физико-математических и (или) естественных наук, и использовать их в профессиональной деятельности	ОПК-1.1 Способен анализировать поставленную задачу, намечать пути ее решения
	ОПК-1.2 Способен строить математические модели, производить количественные расчеты и оценки
	ОПК-1.3 Способен определять границы применимости полученных результатов
ОПК-2 Способен использовать современные информационные технологии и программные средства при решении задач профессиональной деятельности, соблюдая требования информационной безопасности	ОПК-2.1 Способен применять современные вычислительную технику и сервисы сети Интернет в области (сфере) профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Знает и умеет применять численные математические методы и прикладное программное обеспечение для решения научных задач в профессиональной области
ОПК-4 Способен осуществлять сбор и обработку научно-технической и (или) технологической информации для решения фундаментальных и прикладных задач	ОПК-4.1 Владеет методами научного поиска и интеллектуального анализа информации при решении задач профессиональной деятельности
	ОПК-4.2 Знает основные источники научно-технической и (или) технологической информации в области профессиональной деятельности
ОПК-5 Способен участвовать в проведении фундаментальных и прикладных исследований и разработок, самостоятельно осваивать новые теоретические, в том числе, математические методы исследований, и работать на современной экспериментальной научно-исследовательской, измерительно-аналитической и технологической аппаратуре	ОПК-5.1 Способен решать поставленные задачи в области теоретических и экспериментальных исследований и разработок
	ОПК-5.2 Обладает способностью к освоению новых знаний на основе изучения литературы, научных статей и других источников
	ОПК-5.3 Способен к профессиональной эксплуатации современной экспериментальной научно-исследовательской (измерительно-аналитической и технологической) аппаратуры
ПК-1 Способен планировать и проводить научные эксперименты (в избранной предметной области) и (или) теоретические (аналитические и имитационные) исследования	ПК-1.3 Владеет культурой постановки научной задачи и моделирования естественнонаучных объектов и систем
	ПК-1.4 Умеет строить математические модели для описания и исследования процессов и явлений в соответствующих научных областях
	ПК-1.6 Знает основные правила поведения и работы в современной научной лаборатории
	ПК-1.7 Способен оценивать требуемые ресурсы (материальные и временные) для планирования и проведения научного эксперимента
	ПК-1.8 Владеет навыками работы с современными языками программирования и программными пакетами для научных расчетов



ПК-2 Способен анализировать полученные в ходе научно-исследовательской работы данные и делать научные выводы (заключения)	ПК-2.1 Владеет методами статистической обработки и анализа научных данных
	ПК-2.2 Умеет находить ключевые параметры, определяющие изучаемое явление, и производить численные оценки по порядку величины
ПК-3 Способен выбирать и применять подходящее оборудование, инструменты и методы исследований для решения задач в избранной предметной области	ПК-3.3 Умеет производить оценку точности численных методов, используемых на ЭВМ, вычислительной сложности используемых алгоритмов и объема требуемых вычислительных ресурсов
	ПК-3.2 Знает области и критерии применимости используемых теоретических подходов и умение оценивать точность приближенных аналитических методов вычислений
ПК-4 Способен критически оценивать применимость используемых методик и методов	ПК-4.3 Способен обосновать причинно-следственные отношения используемых понятий и моделей

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Численный расчет волновых процессов (ЛФИ)» обучающийся должен:

### знать:

- фундаментальные основы построения численных методов решения гиперболических систем уравнений;
- понятия разностной задачи, аппроксимации, устойчивости, сходимости разностных схем;
- определяющие системы уравнений акустики, упругости, анизотропной упругости, двухконтинуальных систем.

### уметь:

- аналитически исследовать гиперболические уравнения и системы уравнений;
- находить собственные числа и собственные вектора матриц аналитическими и численными методами;
- исследовать гиперболические уравнения и системы уравнений на аппроксимацию и устойчивость;
- строить структурные расчётные сетки;
- реализовывать на языке Python/C++ схемы на расширенном шаблоне;
- реализовывать на языке Python/C++ схемы на компактном шаблоне.

### владеть:

- теоретическими и практическими знаниями о гиперболических системах уравнений и численных методах их решения.

## 3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю

Примеры контрольных вопросов для текущего контроля освоения материала:

- 1) Дайте определение дифференциальной и разностной задач?
- 2) Что такое аппроксимация, устойчивость, сходимость разностной задачи?
- 3) Какие процессы описываются гиперболической системой уравнений?
- 4) Могут ли в акустической среде распространяться сдвиговые волны?
- 5) Сколько граничных условий необходимо для постановки задачи о динамической нагрузке пористой среды?

Примеры упражнений на проверку знаний:

- 1) Получите аналитически собственные значения и собственные вектора для акустической системы.
- 2) Реализуйте численное решение уравнения переноса в одномерном случае для постоянных коэффициентов.
- 3) Выведите интерполяционный полином для компактной продолженной схемы.

#### 4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся

Перечень контрольных вопросов:

1. Гиперболическое уравнение и система уравнений. Аппроксимация, устойчивость и сходимость.
2. Сеточно-характеристический численный метод на примере многомерного уравнения переноса.
3. Акустическая среда: определяющие соотношения, канонический вид системы, начальные и граничные условия, область зависимости решения.
4. Упругая среда: определяющие соотношения, канонический вид системы, начальные и граничные условия, область зависимости решения
5. Анизотропная среда: определяющие соотношения, канонический вид системы, начальные и граничные условия, область зависимости решения
6. Пористая насыщенная среда: определяющие соотношения, канонический вид системы, начальные и граничные условия, область зависимости решения
7. Метод задания граничных условий при реализации вычислительного алгоритма для гиперболической задачи.
8. Реализация явного контактного условия в сеточно-характеристическом методе.
9. Схемы на расширенном шаблоне - порядок аппроксимации, исследование устойчивости.
10. Компактные продолженные схемы - общая идея, вывод основных соотношений, оценка порядка аппроксимации.
11. Точные аналитические решения - функция Грина, задача Лэмба, плоские продольные и поперечные волны.
12. Подходы к построению параллельного вычислительного алгоритма под современные высокопроизводительные системы.
13. Случай разрывных коэффициентов в гиперболическом уравнении - идеи реализации расчётного алгоритма.
14. Количество граничных условий, необходимых для постановки корректной математической задачи гиперболического типа.
15. Структурные и неструктурные расчётные сетки - преимущества и недостатки.

Критерии оценивания

Оценка «отлично (10)» выставляется обучающемуся, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания предмета и в ходе беседы верно и детально ответившего на четыре (4) произвольных вопроса из выше приведенного перечня. Детальный ответ предполагает верные ответы на все уточняющие вопросы. Подготовка и успешная защита курсовой работы является преимуществом. Оценка «отлично (9)» выставляется обучающемуся, если в ходе беседы он верно, но не детально ответил на четыре (4) произвольных вопроса из выше приведенного перечня (мог не ответить на некоторые уточняющие вопросы). Подготовка и успешная защита курсовой работы является преимуществом. Оценка «отлично (8)» выставляется обучающемуся, если в ходе беседы он верно, но не детально ответил на четыре (4) произвольных вопроса из выше приведенного перечня (не ответил на все уточняющие вопросы). Оценка «хорошо (7)» выставляется обучающемуся, если в ходе беседы он верно и достаточно детально ответил на три (3) произвольных вопроса из выше приведенного перечня. Детальный ответ предполагает верные ответы на все уточняющие вопросы. Подготовка и успешная защита курсовой работы является преимуществом. Оценка «хорошо (6)» выставляется обучающемуся, если в ходе беседы он верно, но не детально ответил на три (3) произвольных вопроса из выше приведенного перечня (не ответил на некоторые уточняющие вопросы). Подготовка и успешная защита курсовой работы является преимуществом. Оценка «хорошо (5)» выставляется обучающемуся, если в ходе беседы он верно и достаточно детально ответил на два (2) произвольных вопроса из выше приведенного перечня. Детальный ответ предполагает верные ответы на все уточняющие вопросы. Оценка «удовлетворительно (4)» выставляется обучающемуся, если в ходе беседы он верно и достаточно детально ответил на один (1) произвольный вопрос из выше приведенного перечня. Детальный ответ предполагает верные ответы на все уточняющие вопросы. Подготовка и успешная защита курсовой работы является преимуществом. Оценка «удовлетворительно (3)» выставляется обучающемуся, если в ходе беседы он верно, но не детально ответил на один (1) произвольный вопрос из выше приведенного перечня (не ответил на уточняющие вопросы). Оценка «неудовлетворительно (2)» выставляется обучающемуся, если в ходе беседы он не смог ответить ни на один произвольный вопрос из выше приведенного перечня, но смог ответить на наводящие вопросы и вопросы с «подсказками». Оценка «неудовлетворительно (1)» выставляется обучающемуся, если в ходе беседы он не смог ответить ни на один произвольный вопрос из выше приведенного перечня, а так же ни на один наводящий вопрос.

## **5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности**

Дифференцированный зачет проводится по итогам сдачи практических и теоретических заданий, предусмотренных программой дисциплины, путем организации специального опроса, проводимого в устной форме, а также защиты выпускного проекта.