

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

**УТВЕРЖДЕНО**

**Директор физтех-школы  
прикладной математики и  
информатики**

**А.М. Райгородский**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Вычислительные физика и геофизика
<b>по направлению:</b>	Информатика и вычислительная техника
<b>профиль подготовки:</b>	Математическое моделирование и компьютерные технологии Физтех-школа Прикладной Математики и Информатики кафедра вычислительных технологий и моделирования в геофизике и биоматематике
<b>курс:</b>	4
<b>квалификация:</b>	бакалавр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 8 (весенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 0 час.

семинары: 30 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 15 час.

Всего часов: 45, всего зач. ед.: 1

Программу составил: М.А. Толстых, д-р физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры вычислительных технологий и моделирования в геофизике и биоматематике 04.06.2020

## Аннотация

Дисциплина "Вычислительная физика и геофизика" посвящена вопросам формирования у студентов профессиональных компетенций, связанных с использованием современных теоретических концепций в области вычислительной физики; - развитие умений, основанных на полученных теоретических знаниях и практических навыках, позволяющих на творческом уровне создавать и применять физико-математические модели и численные методы для решения фундаментальных и прикладных физических задач, исследования и моделирования физических процессов и систем; - получение студентами навыков самостоятельной исследовательской работы, предполагающей изучение специфических алгоритмов, инструментов и средств, необходимых для решения фундаментальных и прикладных физических задач, исследования и моделирования физических процессов и систем; - получение практических навыков анализа, обработки и использования экспериментальных и наблюдательных данных для решения фундаментальных и прикладных физических задач, исследования и моделирования физических процессов и систем.

### 1. Цели и задачи

#### Цель дисциплины

– изучение вычислительных методов дискретизации нестационарных уравнений в частных производных, необходимых для решения задач вычислительной гидродинамики, в том числе, математического моделирования атмосферы, океана и окружающей среды.

#### Задачи дисциплины

- освоение студентами базовых знаний в области вычислительных методов;
- формирование навыков самостоятельного построения дискретных конечномерных аналогов уравнений и систем уравнений в частных производных, удовлетворяющих заданным свойствам;
- формирование навыков решения практических задач с использованием методов вычислительной физики.

### 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-6 Способен управлять своим временем, выстраивать и реализовывать траекторию саморазвития на основе принципов образования в течение всей жизни	УК-6.1 Определяет приоритеты профессиональной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки
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-5.2 Обладает способностью к освоению новых знаний на основе изучения литературы, научных статей и других источников

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

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- способы разностной аппроксимации по пространству и методы интегрирования по времени применяемые в задачах геофизической гидродинамики;
- проводить анализ разностных схем;
- постановку проблем математического моделирования;
- свойства и границы применимости изучаемых методов.

уметь:

- самостоятельно построить разностную аппроксимацию первой или второй производной на заданном шаблоне с заданной точностью;
- исследовать вычислительную устойчивость дискретной аппроксимации.

владеть:

- математическим моделированием физических задач;
- научной картиной мира;
- навыками построения дискретной аппроксимации систем уравнений в частных производных гиперболического типа.

#### 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	Основные понятия вычислительной физики, модельные уравнения и их точные решения		2		
2	Анализ разностных аппроксимаций производных по пространству.		2		
3	Построение обычных и компактных схем для аппроксимации первой производной.		2		
4	Монотонные и квазимоноотонные разностные схемы для уравнения переноса.		2		
5	Конечно-объемные методы решения уравнений в частных производных.		4		
6	Полулагранжев метод решения уравнения переноса.		2		
7	Разрывный метод Галеркина.		4		
8	Нелинейная вычислительная неустойчивость и методы ее подавления.		2		
9	Методы численного интегрирования по времени систем уравнений в частных производных.		2		
10	Решение уравнений в частных производных, содержащих первые и вторые производные.		2		
11	Построение обычных и компактных схем для аппроксимации первой производной. Монотонные и квазимоноотонные разностные схемы для уравнения переноса		2		5
12	Полулагранжев метод решения уравнения переноса. Эксперимент "перенос пассивной примеси": решение уравнения переноса различными численными методами в зависимости от типа начального условия и сетки. Анализ сходимости		2		5

13	Эксперимент "Уравнение Бюргерса": нелинейная вычислительная неустойчивость и методы ее подавления		2		5
Итого часов			30		15
Подготовка к экзамену		0 час.			
Общая трудоёмкость		45 час., 1 зач.ед.			

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

Семестр: 8 (Весенний)

##### 1. Основные понятия вычислительной физики, модельные уравнения и их точные решения

Предмет вычислительной физики (отличия от вычислительной математики).

Уравнение переноса. Точное решение уравнения переноса, его свойства. Уравнения мелкой воды.

##### 2. Анализ разностных аппроксимаций производных по пространству.

Фазовая и амплитудная ошибка. Исследование фазовой и амплитудной ошибки разностных схем по пространству для уравнения переноса с помощью Фурье-анализа (на примере схемы направленных разностей и центральных разностей). Модифицированное волновое число, относительная фазовая ошибка.

##### 3. Построение обычных и компактных схем для аппроксимации первой производной.

Построение явных и компактных аппроксимаций для первой производной по пространству методом неопределенных коэффициентов и разложением в ряд Тэйлора. Зависимость фазовой и амплитудной ошибки от порядка аппроксимации.

##### 4. Монотонные и квазимоноотонные разностные схемы для уравнения переноса.

Линейные монотонные схемы для гиперболических уравнений. Теорема Годунова. Примеры линейных монотонных схем. Нелинейные монотонные схемы. Пример построения. Метод коррекции потоков Залесака. Схема Лакса-Вендроффа. Локально-консервативные схемы (примеры). Схемы с ограниченной вариацией. Теорема Хартена о достаточном условии TVD. Примеры схем (лимитеров).

##### 5. Конечно-объемные методы решения уравнений в частных производных.

Построение конечно-объемных схем в произвольных координатах. Эквивалентность методу конечных разностей для декартовых координат. Решение эллиптических уравнений на сфере.

##### 6. Полулагранжев метод решения уравнения переноса.

Описание метода. Критерий устойчивости. Обобщение на двумерный случай. Учет правой части. Достоинства и недостатки. Вариант полулагранжева метода с сохранением массы.

##### 7. Разрывный метод Галеркина.

Описание метода и его вариантов (узловой, модовый). Критерий устойчивости. Достоинства и недостатки

## 8. Нелинейная вычислительная неустойчивость и методы ее подавления.

Свойства точного решения невязкого уравнения Бюргерса. Пример неустойчивой схемы. Построение устойчивой разностной схемы для этого уравнения.

## 9. Методы численного интегрирования по времени систем уравнений в частных производных.

Классификация методов. Простейшие явная и неявная схемы. Исследование фазовой и амплитудной ошибки за счет дискретизации по времени. Исследование устойчивости. Схемы «чехарда», Адамса-Бэшфорта, Кранк-Николсон, Мацуно. Многошаговые и многослойные методы. Методы Рунге-Кутты.

Методы расщепления по пространственным координатам. Расщепление по физическим процессам.

## 10. Решение уравнений в частных производных, содержащих первые и вторые производные.

Точное и численное решение стационарного уравнения переноса-диффузии. Сеточное число Рейнольдса и его значение в различных разностных схемах.

## 11. Построение обычных и компактных схем для аппроксимации первой производной. Монотонные и квазимоноотонные разностные схемы для уравнения переноса

Обсуждается методика построения разностных схем для аппроксимации первой производной по пространству.

Обсуждаются алгоритмы построения квазимоноотонных разностных схем для уравнения переноса.

## 12. Полулагранжев метод решения уравнения переноса. Эксперимент "перенос пассивной примеси": решение уравнения переноса различными численными методами в зависимости от типа начального условия и сетки. Анализ сходимости

Рассматривается полулагранжев метод для линейного и нелинейного уравнений переноса.

На примере численного решения уравнения переноса изучаются типы ошибок разностных схем и методы дискретизации по времени и пространству.

## 13. Эксперимент "Уравнение Бюргерса": нелинейная вычислительная неустойчивость и методы ее подавления

На примере уравнения Бюргерса изучается нелинейная неустойчивость и методы ее подавления.

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

Необходимое оборудование для практических занятий: компьютер и мультимедийное оборудование (проектор, звуковая система)

Необходимое программное обеспечение - браузер

Обеспечение самостоятельной работы —библиотека МФТИ.

## 6.Перечень рекомендуемой литературы

### Основная литература

1. Математические модели в геофизической гидродинамике и численные методы их реализации [Текст]/Г. И. Марчук, В. П. Дымников, В. Б. Залесный, -Л., Гидрометеиздат, 1987
2. Численные методы математической физики [Текст] / А. А. Самарский, А. В. Гулин - М.Научный мир,2000

3. Численные методы, используемые в атмосферных моделях [Текст], монография/пер. с англ. В. П. Садокова, -Л., Гидрометеиздат, 1982

#### Дополнительная литература

1. Введение в вычислительную математику [Текст] : учеб. пособие для вузов / В. С. Рябенский .— 2-е изд., испр. — М : Физматлит, 2000 .— 296 с.
2. Численные методы [Текст] / Н. С. Бахвалов, Н. П. Жидков, Г. М. Кобельков ; МГУ им. Ломоносова - М.БИНОМ. Лаб. знаний, 2006
1. Рябенский В.С. Введение в вычислительную математику. 2-е изд., исправ. - М.: Физматлит, 2000. 296с. ISBN 5-9221-047-5.
2. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.Г. Численные методы. 8-ое изд. М.: Лаборатория базовых знаний, 2000, 624 с.

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

1. <http://vsc.inm.ras.ru>
2. <https://www.ecmwf.int/en/learning/workshops-and-seminars/workshop-numerical-and-computational-methods-simulation-all-scale-geophysical-flows>
- 3 <https://confluence.ecmwf.int/display/OPTR/Advanced+Numerical+Methods>

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

Информационные ресурсы, доступные через Internet: учебные пособия и сборники задач, разработанные по вычислительным методам.

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

Студент, изучающий дисциплину, должен с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике. В результате изучения дисциплины студент должен знать основные определения, понятия, аксиомы, алгоритмы.

Успешное освоение курса требует напряжённой самостоятельной работы студента. В программе курса приведено минимально необходимое время для работы студента над темой. Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение и конспектирование рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала (по конспектам лекций, учебной и научной литературе), подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения, доказательство отдельных утверждений, свойств;
- подготовку к дифференцированному зачету.

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

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями к лектору.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

<b>по направлению:</b>	Информатика и вычислительная техника
<b>профиль подготовки:</b>	Математическое моделирование и компьютерные технологии Физтех-школа Прикладной Математики и Информатики кафедра вычислительных технологий и моделирования в геофизике и биоматематике
<b>курс:</b>	<u>4</u>
<b>квалификация:</b>	бакалавр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 8 (весенний) - Дифференцированный зачет	
<b>Разработчик:</b>	М.А. Толстых, д-р физ.-мат. наук

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-6 Способен управлять своим временем, выстраивать и реализовывать траекторию саморазвития на основе принципов образования в течение всей жизни	УК-6.1 Определяет приоритеты профессиональной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки
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-5.2 Обладает способностью к освоению новых знаний на основе изучения литературы, научных статей и других источников

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Вычислительные физика и геофизика» обучающийся должен:

### знать:

- способы разностной аппроксимации по пространству и методы интегрирования по времени применяемые в задачах геофизической гидродинамики;
- проводить анализ разностных схем;
- постановку проблем математического моделирования;
- свойства и границы применимости изучаемых методов.

### уметь:

- самостоятельно построить разностную аппроксимацию первой или второй производной на заданном шаблоне с заданной точностью;
- исследовать вычислительную устойчивость дискретной аппроксимации.

### владеть:

- математическим моделированием физических задач;
- научной картиной мира;
- навыками построения дискретной аппроксимации систем уравнений в частных производных гиперболического типа.

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

С целью контроля освоения обучающимися учебного материала проводится устный опрос в начале занятия или в конце занятия по пройденной теме.

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

Перечень вопросов для сдачи дифференцированного зачета в 8 семестре:

1. Что такое монотонная разностная схема для уравнения переноса?
2. Какого порядка точности может быть линейная монотонная разностная схема?
3. Что такое разностная схема с уменьшающейся вариацией?
4. Локальная консервативность.
5. Метод конечных объемов – отличия от метода конечных разностей
6. Суть полулагранжева метода для описания адвекции
7. Преимущества и недостатки полулагранжева метода
8. Схема интегрирования по времени Мацуно



9. Зачем нужен фильтр Асселина для схемы интегрирования по времени «чехарда»? Какую ошибку он вносит?
10. Суть метода расщепления по физическим процессам, ограничения метода.
11. Что такое нелинейная неустойчивость и как с ней бороться.
12. Разрывный метод Галеркина – отличия от методов конечных разностей, конечных объемов и «обычного» метода Галеркина
13. Различия между узловой и модовой реализациями разрывного метода Галеркина

#### Критерии оценивания

Оценка отлично 10 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 9 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 8 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.

Оценка хорошо 7 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка хорошо 6 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка хорошо 5 баллов - выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка удовлетворительно 4 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка удовлетворительно 3 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка неудовлетворительно 2 балла - выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка неудовлетворительно 1 балл - выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

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

Во время проведения дифференцированного зачета обучающиеся могут пользоваться программой дисциплины, а также справочной литературой, вычислительной техникой, конспектами лекций.

Дифференцированный зачет может проводиться по итогам текущей успеваемости и сдачи заданий, или путем организации специального опроса, проводимого в устной форме.