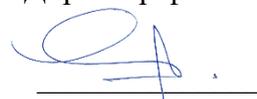


Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова  
Филиал Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова  
в городе Сарове

УТВЕРЖДАЮ

Директор филиала МГУ в городе  
Сарове

 /В.В. Воеводин/

## **РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)**

**Наименование дисциплины (модуля):**

**Генераторы потоков в вычислительной гидродинамике.**

**Уровень высшего образования:**

**магистратура**

**Направление подготовки (специальность):**

**01.04.02 "Прикладная математика и информатика"**

**Направленность (профиль) ОПОП:**

**"Вычислительные методы и методика моделирования"**

**"Суперкомпьютерные технологии математического моделирования и обработки данных"**

---

**Форма обучения:**

**Очная**

Саров 2021

Рабочая программа дисциплины (модуля) разработана в соответствии с самостоятельно установленным МГУ образовательным стандартом (ОС МГУ) для реализуемых основных профессиональных образовательных программ бакалавриата, магистратуры, реализуемых последовательно по схеме интегрированной подготовки по направлениям 01.04.02 «Прикладная математика и информатика» в редакции приказа МГУ от 30 декабря 2016 г.

## РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

### 1. НАИМЕНОВАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Генераторы потоков в вычислительной гидродинамике.

### 2. УРОВЕНЬ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

Подготовка научно-педагогических кадров в магистратуре.

### 3. НАПРАВЛЕНИЕ ПОДГОТОВКИ, НАПРАВЛЕННОСТЬ (ПРОФИЛЬ) ПОДГОТОВКИ

Направление 01.04.02 «Прикладная математика и информатика».

### 4. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОСНОВНОЙ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

Дисциплина входит в необязательную часть магистерской образовательной программы «Численные методы и математическое моделирование», изучается в 1-м семестре.

### 5. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ

Дисциплина участвует в формировании следующих компетенций образовательной программы:

Формируемые компетенции	Планируемые результаты обучения
-------------------------	---------------------------------

Способность строить и анализировать разностные методы решения систем дифференциальных уравнений гиперболического типа (СПК-36);

Способность написать программную реализацию основных численных методов решения систем дифференциальных уравнений гиперболического типа и интерпретировать результаты их работы (СПК-36)

В1(СПК-36) Владеть:

основными методами построения и анализа разностных алгоритмов решения систем дифференциальных уравнений гиперболического типа.

31(СПК-36) Знать:

физическую интерпретацию основных методов построения разностных схем и методов анализа качества результатов математического моделирования

32(СПК-36) Знать:

основные области применения численных методов решения систем дифференциальных уравнений гиперболического типа в задачах индустриальной математики

У1(СПК-36) Уметь:

проводить сравнительный анализ результатов работы различных численных методов.

У2(СПК-36) Уметь:

определять область применимости численного метода.

В1(СПК-36) Владеть:

навыками написания программной реализации основных численных методов решения систем дифференциальных уравнений гиперболического типа.

В2(СПК-36) Владеть:

методикой обработки и представления результатов математического моделирования.

У1(СПК-36) Уметь:

анализировать результаты работы программной реализации численного метода.

## **6. ОБЪЕМ ДИСЦИПЛИНЫ**

Объем дисциплины составляет 2 зачетные единицы, всего 72 часа.

58 часа составляет контактная работа с преподавателем – 48 часов занятий лекционного типа, 0 часов занятий семинарского типа (семинары, научно-практические занятия, лабораторные работы и т.п.), 2 часа индивидуальных консультаций, 2 часа групповых консультаций, 2 часа мероприятий текущего контроля успеваемости, 4 часа – экзамен, 52 часа составляет самостоятельная работа учащегося.

## **7. ВХОДНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ**

Учащиеся должны владеть знаниями по математическому анализу, линейной алгебре, уравнениям математической физики, численным методам в объеме, соответствующем основным образовательным программам бакалавриата по укрупненным группам направлений и специальностей 01.00.00 «Математика и механика», 02.00.00 «Компьютерные и информационные науки».

## **8. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

Лекционно-семинарская система обучения с использованием информационно-коммуникативных технологий.

## **9. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

В курсе дается обзор современных методов решения задач вычислительной гидродинамики (систем нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных гиперболического типа). Акцент делается на процедуре вычисления потоков, рассматриваются различные методы выбора потоков на гранях вычислительной сетки: Годуновские методы, approximate Riemann solvers, характеристические методы, методы Active Flux и другие. Вводятся явные, неявные и локально-неявные методы вычисления потоков, рассматриваются варианты их гибридизации для моделирования трансзвуковых течений. Особое внимание уделяется свойству временной обратимости методов, для некоторого класса схем с характеристическими методами выбора потоков доказываемая их временная обратимость. На примере одномерных уравнений мелкой воды вводятся основные тестовые задачи для верификации численных методов на трансзвуковых течениях. Приводятся примеры использования схем с характеристическим методом выбора потоков в промышленных задачах (задачи вибрационного горения, термоконвекции и др.).

Курс включает элементы практикума, по мере прохождения курса слушателям предлагается реализовать несколько методов для решения одномерных уравнений мелкой воды и пройти их верификацию на предложенных тестовых задачах.

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины, форма промежуточной аттестации по дисциплине	Всего (часы)	В том числе								
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы					Самостоятельная работа учащегося, часы			
		из них					из них			
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Групповые консультации	Индивидуальные консультации	Учебные занятия, направленные на проведение текущего контроля успеваемости: коллоквиумы, практические контрольные занятия и др.	<b>Всего</b>	Выполнение домашних заданий	Подготовка рефератов и т.п..	<b>Всего</b>

<p><b>Тема 1. Методы построения разностных схем высокого порядка для систем дифференциальных уравнений гиперболического типа.</b></p> <p>Системы дифференциальных уравнений в частных производных гиперболического типа. Законы сохранения и их аппроксимация. Методы аппроксимации потоков: явные, локально- неявные и неявные методы. Годуновские методы, приближенные римановские методы, схемы MUSCL, ENO, WENO, TVD, схемы с лимитерами потоков. Характеристические методы вычисления потоков. Методы Active Flux и КАБАРЕ.</p>	<b>32</b>	16	-	-	-	-	<b>16</b>	-	16	<b>16</b>
--	-----------	----	---	---	---	---	-----------	---	----	-----------

<p><b>Тема 2. Характеристические методы вычисления потоков для трансзвуковых течений.</b></p> <p>Основные проблемы характеристических методов на трансзвуковых течениях, звуковые точки. Свойство временной обратимости. Построение алгоритмов обработки звуковых точек на основе принципа временной обратимости.</p> <p>Лемма о временной обратимости некоторого класса балансно-характеристических методов.</p> <p>Задачи о распаде разрыва. Тесты Торо для схем для трансзвуковых течений.</p>	<b>20</b>	10	-	-	-	-	<b>10</b>	-	10	<b>10</b>
---	-----------	----	---	---	---	---	-----------	---	----	-----------

<p><b>Тема 3. Использование схем с характеристическим методом построения потоков для решения задач индустриальной математики.</b>  Задачи вибрационного горения. Труба Рийке. Обратная связь. Балансно-характеристические методы решения задачи о трубе Рийке.  Задачи турбулентной термоконвекции. Уравнения термоконвекции в приближении Буссинеска. Балансно-характеристические методы решения задач термоконвекции.</p>	<b>8</b>	4	-	-	-	-	<b>4</b>	-	4	<b>4</b>
<p><b>Практикум</b>  Решение одномерных уравнений мелкой воды в случае трансзвуковых течений различными методами с использованием языка программирования C/C++/C#.</p>	<b>10</b>	-	-	2	-	-	<b>2</b>	8	-	<b>8</b>

Промежуточная аттестация – индивидуальное собеседование и сдача заданий практикума	2	-	-	-	-	2	2	-	-	-
<b>Итого</b>	<b>72</b>						<b>34</b>			<b>38</b>

## 10. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ УЧАЩИХСЯ

Самостоятельная работа учащихся состоит в изучении лекционного материала, учебно-методической литературы, выполнении задач практикума, подготовки к практическим заданиям текущего контроля и промежуточной аттестации.

## 11. РЕСУРСНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

### Основная учебно-методическая литература

1. Самарский А.А. Введение в численные методы. М.: Наука, 1982, 271с.
2. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы математической физики. М.: Научный мир, 2000, 315 с.
3. Lomax, H., Pulliam, T.H. and Zingg, D.W., Fundamentals of Computational Fluid Dynamics, Scientific Computation, Spinger-Verlag, Berlin, 2001. 249 pp. ISBN 3-540-41607-2
4. Pulliam, T.H. and Zingg, D.W., Fundamentals Algorithms in Computational Fluid Dynamics, Scientific Computation, Spinger-Verlag, Berlin, 2014. 211 pp., ISBN 978-3-319-05053-9
5. Новые алгоритмы вычислительной гидродинамики для многопроцессорных вычислительных систем / В. М. Головизнин, М. А. Зайцев, С. А. Карабасов, И. А. Короткин. — Издательство Московского университета Москва, 2013. — 467 с.
6. Charles Hirsch. 1988. Numerical computation of internal & external flows: fundamentals of numerical discretization. John Wiley & Sons, Inc., USA.

### Дополнительная учебно-методическая литература

1. Б.В. Раушенбах. Вибрационное горение. – М.: Гос. изд-во физико-математической лит., 1961. – 500 с.
2. Головизнин В. М., Короткин И. А., Финогенов С. А. Беспараметрический численный метод для расчета термоконвекции в прямоугольных кавернах в широком диапазоне чисел Релея // *Вычислительная механика сплошных сред - Computational continuum mechanics*. — 2015. — Т. 8, № 1. — С. 60–70.
3. Прямое моделирование термоакустической неустойчивости в газогенераторах по схеме КАБАРЕ / Н. А. Афанасьев, В. М. Головизнин, В. Н. Семенов и др. // *Математическое моделирование*. — 2021. — Т. 33, № 2. — С. 3–19.
4. Afanasiev N., Goloviznin V. A locally implicit time-reversible sonic point processing algorithm for one-dimensional shallow-water equations // *Journal of Computational Physics*. — 2021. — Vol. 434. — P. 110220.
5. Eymann, Timothy & Roe, Philip. (2011). Active Flux Schemes for Systems. 20th AIAA Computational Fluid Dynamics Conference 2011.

Лицензионное программное обеспечение, в том числе отечественного производства  
 При реализации дисциплины может быть использовано следующее программное обеспечение:

1. Программный продукт Red Hat Enterprise Linux Server for HPC Compute Node for Power, LE, Self-support 4 шт. №5540331
2. Программный продукт Red Hat Enterprise Linux Server for HPC Head Node for Power, LE, Standard 1 шт. №5540332
3. Операционная система SUSE Linux Enterprise Server 11 SP4 for x86\_64 16 шт.
4. Операционная система Red Hat Enterprise Linux Server 5.0 for x86\_64 14шт.
5. Операционная система SUSE Linux Enterprise Server 10 SP3 for ppc64 7 шт.
6. Операционная система Ubuntu 18.04.
7. Программное обеспечение для виртуализации Oracle VM VirtualBox
8. Операционная система ALTLinuxMATEStarterkit 9 лицензияGPL
9. Программный продукт JetBrains IntelliJ IDEA Community Edition Free Educational Licenses
10. Программный продукт JetBrains PyCharm Community Edition Free Educational Licenses
11. Программный продукт JetBrains CLion Community Edition Free Educational Licenses
12. Программный продукт UPPAAL (<http://www.uppaal.org/>) академическая лицензия

13. Программный продукт Java 8 (64-bit) Oracle Corporation
14. Программный продукт Java SE Development Kit 8(64-bit) Oracle Corporation
15. Программный продукт NetBeans IDE 8.2 NetBeans.org
16. Программный продукт Dev-C++ Bloodshed Software
17. Программный продукт CodeBlocks The Code::Blocks Team
18. Программный продукт Free Pascal 3.0.0 Free Pascal Team
19. Программный продукт Python 3.5.1 (64-bit) Python Software Foundation
20. Программный продукт R for Windows 3.2.2 R Core Team
21. Программный продукт Haskell Platform 7.10.3 Haskell.org
22. Операционная система Microsoft Windows 7 корпоративная академическая лицензия
23. Операционная система Microsoft Windows 10 Education академическая лицензия
24. Программный продукт Microsoft Project Professional 2013 академическая лицензия
25. Программный продукт Microsoft Visio Professional 2013 академическая лицензия
26. Программный продукт Microsoft Visual Studio Professional 2013 - RUS [Русский (Россия)] академическая лицензия

Профессиональные базы данных и информационные справочные системы

1. <http://www.edu.ru> – портал Министерства образования и науки РФ
2. <http://www.ict.edu.ru> – система федеральных образовательных порталов «ИКТ в образовании»
3. <http://www.openet.ru> - Российский портал открытого образования
4. <http://www.mon.gov.ru> - Министерство образования и науки Российской Федерации
5. <http://www.fasi.gov.ru> - Федеральное агентство по науке и инновациям

## **Информационные технологии, используемые в процессе обучения**

В процессе обучения используются пакеты прикладных программ MATLAB, Tecplot.

## **Материально-техническая база**

Для преподавания дисциплины требуется класс, оборудованный маркерной или меловой доской.

**12. ЯЗЫК ПРЕПОДАВАНИЯ**

Русский

**13. РАЗРАБОТЧИК ПРОГРАММЫ, ПРЕПОДАВАТЕЛИ**

аспирант Афанасьев Никита Александрович

**Оценочные средства для промежуточной аттестации по дисциплине**

**«Генераторы потоков в вычислительной гидродинамике.**

»

Средства для оценивания планируемых результатов обучения, критерии и показатели оценивания приведены ниже.

РЕЗУЛЬТАТ ОБУ- ЧЕНИЯ	КРИТЕРИИ и ПОКАЗАТЕЛИ ОЦЕНИВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТА ОБУЧЕНИЯ из соответствующих карт компетенций					ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА
	1	2	3	4	5	
	<b>Неудовле- творитель- но</b>	<b>Неудовлетвори- тельно</b>	<b>Удовлетворительно</b>	<b>Хорошо</b>	<b>Отлично</b>	
СПК-36: Способность стро- ить и анализиро- вать разностные методы решения систем дифферен- циальных уравне- ний гиперболиче- ского типа	Отсутствие знаний	Фрагментарное знание содержа- ния курса.	В целом сформирован- ное, но неполное зна- ние всех разделов кур- са	Сформированное, но содержащие отдельные пробе- лы знание всех разделов курса	Сформирован- ные системати- ческие знания всех раз- делов курса.	индивидуальное собеседование

<p>СПК-36 Способность написать программную реализацию основных численных методов решения систем дифференциальных уравнений гиперболического типа и интерпретировать результаты их работы</p>	<p>Отсутствие навыков</p>	<p>Отсутствие навыков написания программной реализации основных численных методов решения систем дифференциальных уравнений гиперболического типа</p>	<p>В целом сформированное, но не систематическое умение написания программной реализации основных численных методов решения систем дифференциальных уравнений гиперболического типа и интерпретации результатов их работы</p>	<p>Сформированное, но содержащие отдельные пробелы умение написания программной реализации основных численных методов решения систем дифференциальных уравнений гиперболического типа и интерпретации результатов их работы</p>	<p>Сформированное систематическое умение написания программной реализации основных численных методов решения систем дифференциальных уравнений гиперболического типа и интерпретации результатов их работы</p>	<p>задание практикума</p>
--	---------------------------	---	---	---	--	---------------------------

### Фонды оценочных средств

#### Примерный перечень задач практикума.

1. Написать программную реализацию метода Рунге для решения одномерных уравнений мелкой воды. Провести верификацию программы на тестах Торо для трансзвуковых течений.
2. Написать программную реализацию метода КАБАРЕ для решения одномерных уравнений мелкой воды. Провести верификацию программы на тестах Торо для трансзвуковых течений.
3. Написать программную реализацию метода Годунова для решения одномерных уравнений мелкой воды. Провести верификацию программы на тестах Торо для трансзвуковых течений.
4. Написать программную реализацию метода Active Flux для решения одномерных уравнений мелкой воды. Провести верификацию программы на тестах Торо для трансзвуковых течений.

## **Список вопросов для индивидуального собеседования на промежуточной аттестации.**

1. Системы квазилинейных дифференциальных уравнений в частных производных гиперболического типа. Определение, основные свойства, инварианты Римана, примеры.
2. Аппроксимация законов сохранения. Примеры.
3. Аппроксимация потоков методом Годунова.
4. Аппроксимация потоков методом Роу.
5. Аппроксимация потоков методами MUSCL, лимитеры потоков.
6. Монотонность разностных схем. Теорема Годунова.
7. TVD-схемы. Определение, примеры.
8. Характеристические методы аппроксимации потоков. Методы КАБАРЕ и Active Flux.
9. Звуковые точки в балансно-характеристических методах. Обратимые и необратимые по времени алгоритмы обработки звуковых точек.
10. Решение задачи о распаде разрыва для одномерных уравнений мелкой воды.
11. Задача о трубе Рийке. Обратная связь. Балансно-характеристические схемы для задачи о трубе Рийке.
12. Турбулентная термоконвекция. Балансно-характеристические схемы для задач турбулентной термоконвекции.