

**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

Рабочая программа дисциплины (модуля)

по дисциплине:	Регуляризованные уравнения при моделировании задач динамики газа и жидкости в OpenFOAM
по направлению:	Информатика и вычислительная техника
профиль подготовки:	Прикладная математика и информатика Физтех-школа Прикладной Математики и Информатики кафедра математического моделирования и прикладной математики
курс:	2
квалификация:	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 3 (осенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 30 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 75 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Программу составил: Т.Г. Елизарова, д-р физ.-мат. наук, профессор

Программа обсуждена на заседании кафедры математического моделирования и прикладной математики
02.04.2024

Аннотация

В курсе лекций будут затронуты вопросы, касающиеся использования пакетов программ для решения задач газо- и гидродинамики с применением многопроцессорных высокопроизводительных вычислительных комплексов. В частности, будет рассказано о современном открытом комплексе OpenFOAM. В качестве основного рабочего алгоритма будет рассказано об алгоритме, основанном на так называемых регуляризованных уравнениях гидродинамики, основа которых была создана в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.

Будут изложены способы построения соответствующих уравнений, вариант их численной реализации, адаптация алгоритмов для их включения в пакет. Будут приведены примеры постановки и результатов решения конкретных задач. В курсе предполагается прохождение студентами мастер-классов по численному моделированию типичных задач течений вязкой жидкости и сжимаемого газа с использованием указанного пакета.

Предполагается, что курс будет состоять из лекций и лабораторных работ, которые будут посвящены практической работе моделирования течений на многопроцессорной вычислительной системе в пакете OpenFOAM.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

- освоение студентами фундаментальных знаний о методах и подходах решения задач динамики газа и жидкости на многопроцессорных высокопроизводительных вычислительных системах с применением прикладного программного комплекса OpenFOAM.

Задачи дисциплины

- формирование базовых знаний в области математического моделирования в задачах динамики жидкости и газа с применением инструментария прикладного комплекса OpenFOAM как дисциплины, интегрирующей подготовку специалистов в области математической физики и обеспечивающей технологические основы современных инновационных сфер деятельности;
- обучение студентов применению аппарата регуляризованных уравнений к задачам численного моделирования в задачах динамики жидкости и газа;
- формирование навыков моделирования, проведения исследовательской работы и высокопроизводительных вычислений, используя современный прикладной комплекс OpenFOAM.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ПК-2 Понимает и способен применить в научно-исследовательской и прикладной деятельности основные законы естествознания, современный математический аппарат и алгоритмы, современные информационно-коммуникационные технологии	ПК-2.1 Знает основы научно-исследовательской деятельности в области информационных технологий, владеет знанием основ философии и методологии науки; знанием методов научных исследований и навыками их проведения
	ПК-2.2 Умеет применять полученные знания в области фундаментальных научных основ теории информации и решать стандартные задачи в собственной научно-исследовательской деятельности
	ПК-2.3 Имеет практический опыт научно-исследовательской деятельности в области информационно-коммуникационных технологий
	ПК-2.4 Владеет методами и алгоритмами решения задач цифровой обработки сигналов, использования сети Интернет, аннотирования, реферирования, библиографического поиска, опыт работы с научными источниками

ПК-3 Владеет навыками участия в научных дискуссиях, выступления с сообщениями и докладами устного, письменного и виртуального (размещение в информационных сетях) характера, представления материалов собственных исследований	ПК-3.1 Знает основы ведения научной дискуссии и формы устного научного высказывания
	ПК-3.2 Умеет вести корректную дискуссию в области информационных технологий задавать вопросы и отвечать на поставленные вопросы по теме научной работы
	ПК-3.3 Имеет практический опыт участия в научных студенческих конференциях, очных, виртуальных, заочных обсуждениях научных проблем в области информационных технологий
ПК-1 Готов к включению в профессиональное сообщество; способен проводить под научным руководством локальные исследования на основе существующих методов в конкретной области профессиональной деятельности	ПК-1.1 Знает принципы построения научной работы, методы сбора и анализа полученного материала, способы аргументации; владеет навыками подготовки научных обзоров, публикаций, рефератов и библиографий по тематике проводимых исследований на русском и английском языке
	ПК-1.2 Умеет решать научные задачи с пониманием существующих подходов к верификации моделей программного обеспечения в связи с поставленной целью и в соответствии с выбранной методикой
	ПК-1.3 Имеет практический опыт выступлений и научной аргументации при анализе объекта научной и профессиональной деятельности

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- базовые сведения и понятия о моделях и подходах к моделированию в задачах динамики жидкости и газа;
- основы применения регуляризованных уравнений к задачам численного моделирования в задачах динамики жидкости и газа;
- базовые сведения и понятия эффективной работы с прикладными программными пакетами на высокопроизводительных вычислительных системах;
- основной инструментарий создания, описания и анализа модельных задач на OpenFOAM.

уметь:

- исследовать математические модели для расчета течений жидкости и газа;
- использовать инструментарий для моделирования процессов и явлений в прикладном пакете OpenFOAM;
- анализировать и визуализировать результаты моделирования расчетов течений жидкости и газа в OpenFOAM.

владеть:

- аппаратом регуляризованных уравнений к задачам численного моделирования в задачах динамики жидкости и газа;
- навыками численного моделирования течений жидкости и газа с использованием программных средств OpenFOAM;
- навыками анализа и обработки результатов расчета в среде OpenFOAM;
- культурой поиска и обработки актуальной научной информации (статей, книг) на русском и английском языках в сети Интернет.

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

		Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.
--	--	---

№	Тема (раздел) дисциплины	Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Программные пакеты для высокопроизводительных вычислений	2	2		15
2	Уравнения газо- и гидродинамики	4	4		10
3	Регуляризованные уравнения газо- и гидродинамики	4	4		10
4	Численные алгоритмы решения уравнений газовой динамики	6	6		10
5	Численные алгоритмы решения задач с учетом эффектов, описываемых течением вязкой несжимаемой жидкости	6	6		10
6	Численные алгоритмы решения задач с учетом эффектов, описываемых приближением мелкой воды	6	6		10
7	Дополнительные вопросы при работе в OpenFOAM	2	2		10
Итого часов		30	30		75
Подготовка к экзамену		0 час.			
Общая трудоёмкость		135 час., 3 зач.ед.			

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

Семестр: 3 (Осенний)

1. Программные пакеты для высокопроизводительных вычислений

О программных пакетах применительно к задачам газо- и гидродинамики. Высокопроизводительные вычисления. Краткий перечень востребованных задач. Индивидуальные пакеты, коммерческие пакеты, открытые пакеты. Высокопроизводительные системы, сетки, примеры. Достоинства и недостатки различных подходов к написанию и использованию пакетов.

2. Уравнения газо- и гидродинамики

Уравнения газо- и гидродинамики. Основы их построения. Инвариантный вид и законы сохранения. Уравнения Эйлера, Навье-Стокса, несжимаемой жидкости, мелкой воды, смесей газов и жидкостей.

3. Регуляризованные уравнения газо- и гидродинамики

Регуляризованные уравнения газо- и гидродинамики. Построение уравнений на примере пространственно-временного осреднения. Связь регуляризованных уравнений и уравнений Навье-Стокса

4. Численные алгоритмы решения уравнений газовой динамики

Численные алгоритмы решения уравнений газовой динамики. Метод конечного объема. Примеры его применения к одномерным и многомерным задачам.

Включение алгоритма конечного объема в открытый пакет Open-FOAM. Архив исходного кода на GitHub. Архитектура. Распараллеливание. Особенности реализации, явно-неявный алгоритмы. Мастер-класс по моделированию газодинамических течений.

5. Численные алгоритмы решения задач с учетом эффектов, описываемых течением вязкой несжимаемой жидкости

Уравнения для описания течений вязкой несжимаемой жидкости. Естественные переменные и переменные функция тока-вихрь скорости.

Включение численного алгоритма в комплекс OpenFOAM: расширение для моделирования задач о смесях, переносе примеси, задачах с учетом эффектов поверхностного натяжения. Мастер-класс по указанным задачам.

6. Численные алгоритмы решения задач с учетом эффектов, описываемых приближением мелкой воды

Уравнения гидродинамики в приближении мелкой воды. Численные алгоритмы решения с использованием регуляризованных уравнений.

Включение алгоритмов в пакет OpenFOAM: Примеры решенных задач. Базовые принципы настройки расчетных случаев. Мастер-класс по моделированию течений жидкости в неглубоких водоемах.

7. Дополнительные вопросы при работе в OpenFOAM

Открытый пакет OpenFOAM и построение сеток, подключение дополнительных модулей для вычисления коэффициентов переноса, условий на стенках, графической обработки результатов. Перспективы развития открытого пакета OpenFOAM.

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

Учебная аудитория для проведения занятий лекционного типа, оснащённая маркерной доской и набором маркеров, компьютером, подключенным к сети «Интернет», мультимедийным проектором и экраном.

6. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Теория разностных схем [Текст] / А. А. Самарский - М. Наука, 1983
2. Разностные методы решения задач газовой динамики [Текст] : уч. пособие для вузов : доп. Гос. ком. СССР / А. А. Самарский, Ю. П. Попов .— 5-е изд. — М. : Кн. дом "ЛИБРОКОМ", 2009 .— 424 с.
1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. т.6. Гидродинамика. Москва, Наука, 1986.
2. Берд Г.А. Молекулярная газовая динамика. Москва, 1981.
3. Шеретов Ю.В. Математические модели гидродинамики. Учебное пособие. Тверь, Тверской гос. Университет, 2004.
4. Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П. т.10. Физическая кинетика. Москва, Физматлит, 2002.
5. Елизарова Т.Г. Квазигазодинамические уравнения и методы расчета вязких течений. Москва, Научный мир, 2007.

Дополнительная литература

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

- Электронная библиотека ИПИМ им. М.В. Келдыша РАН: <https://keldysh.ru/e-biblio/>
- Базакниг и журналов издательства Springer: <https://www.springer.com/gp/>

– База книг и журналов издательства Elsevier: <https://www.elsevier.com/books-and-journals>

1. Сайт посвященный OpenFOAM <https://openfoam.org/guides/>

2. Сайт автора лекций с дополнительными материалами <http://elizarova.imamod.ru>

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

Компиляторы и трансляторы для языка C++, библиотека OpenMP, библиотека MPI, доступ к веб-сервис GitHub, среда OpenFOAM

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, методы доказательств.

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;
- выполнение лабораторных работ, для осознания связей между теорией и практическими навыками;
- 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)

по направлению:	Информатика и вычислительная техника
профиль подготовки:	Прикладная математика и информатика Физтех-школа Прикладной Математики и Информатики кафедра математического моделирования и прикладной математики
курс:	<u>2</u>
квалификация:	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 3 (осенний) - Дифференцированный зачет

Разработчик: Т.Г. Елизарова, д-р физ.-мат. наук, профессор

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ПК-2 Понимает и способен применить в научно-исследовательской и прикладной деятельности основные законы естествознания, современный математический аппарат и алгоритмы, современные информационно-коммуникационные технологии	ПК-2.1 Знает основы научно-исследовательской деятельности в области информационных технологий, владеет знанием основ философии и методологии науки; знанием методов научных исследований и навыками их проведения
	ПК-2.2 Умеет применять полученные знания в области фундаментальных научных основ теории информации и решать стандартные задачи в собственной научно-исследовательской деятельности
	ПК-2.3 Имеет практический опыт научно-исследовательской деятельности в области информационно-коммуникационных технологий
	ПК-2.4 Владеет методами и алгоритмами решения задач цифровой обработки сигналов, использования сети Интернет, аннотирования, реферирования, библиографического поиска, опыт работы с научными источниками
ПК-3 Владеет навыками участия в научных дискуссиях, выступления с сообщениями и докладами устного, письменного и виртуального (размещение в информационных сетях) характера, представления материалов собственных исследований	ПК-3.1 Знает основы ведения научной дискуссии и формы устного научного высказывания
	ПК-3.2 Умеет вести корректную дискуссию в области информационных технологий задавать вопросы и отвечать на поставленные вопросы по теме научной работы
	ПК-3.3 Имеет практический опыт участия в научных студенческих конференциях, очных, виртуальных, заочных обсуждениях научных проблем в области информационных технологий
ПК-1 Готов к включению в профессиональное сообщество; способен проводить под научным руководством локальные исследования на основе существующих методов в конкретной области профессиональной деятельности	ПК-1.1 Знает принципы построения научной работы, методы сбора и анализа полученного материала, способы аргументации; владеет навыками подготовки научных обзоров, публикаций, рефератов и библиографий по тематике проводимых исследований на русском и английском языке
	ПК-1.2 Умеет решать научные задачи с пониманием существующих подходов к верификации моделей программного обеспечения в связи с поставленной целью и в соответствии с выбранной методикой
	ПК-1.3 Имеет практический опыт выступлений и научной аргументации при анализе объекта научной и профессиональной деятельности

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Регуляризованные уравнения при моделировании задач динамики газа и жидкости в OpenFOAM» обучающийся должен:

знать:

- базовые сведения и понятия о моделях и подходах к моделированию в задачах динамики жидкости и газа;
- основы применения регуляризованных уравнений к задачам численного моделирования в задачах динамики жидкости и газа;
- базовые сведения и понятия эффективной работы с прикладными программными пакетами на высокопроизводительных вычислительных системах;
- основной инструментарий создания, описания и анализа модельных задач на OpenFOAM.

уметь:

- исследовать математические модели для расчета течений жидкости и газа;
- использовать инструментарий для моделирования процессов и явлений в прикладном пакете OpenFOAM;
- анализировать и визуализировать результаты моделирования расчетов течений жидкости и газа в OpenFOAM.

владеть:

- аппаратом регуляризованных уравнений к задачам численного моделирования в задачах динамики жидкости и газа;
- навыками численного моделирования течений жидкости и газа с использованием программных средств OpenFOAM;
- навыками анализа и обработки результатов расчета в среде OpenFOAM;
- культурой поиска и обработки актуальной научной информации (статей, книг) на русском и английском языках в сети Интернет.

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 по теме прошлой лекции или в конце занятия по пройденной теме.

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

- 1.Процедуры осреднения. Пространственные и пространственно-временные средние. Интегральные законы сохранения. Переход к дифференциальным уравнениям. Дифференциальные уравнения в виде законов сохранения.
2. Классический способ замыкания – уравнения Навье-Стокса и уравнения Эйлера. Диссипативная функция.
- 3.Нетрадиционный способ замыкания – квазигазодинамические и квазигидродинамические (КГД) системы. Построение КГД систем на основе осреднения уравнений Навье-Стокса по малому промежутку времени. Вид уравнений Навье-Стокса и КГД уравнений для плоского одно-мерного течения.
- 4.Численный алгоритм решения одномерных задач газовой динамики. Разностные аппроксимация нестационарных уравнений. Направленные разности и центральные разности. КГД уравнения для построения численного алгоритма. Введение искусственной диссипации. Задача о распаде сильного разрыва.
- 5.Уравнения Навье-Стокса для двумерных плоских течений. Задача о течении газа в канале. Начальные и граничные условия. Пример точного решения – течение Куэтта. Течение Пуазейля для сжимаемого газа.
6. Численный алгоритм решения двумерных задач газовой динамики. Разностная аппроксимация нестационарных уравнений. Аппроксимация граничных условий с помощью фиктивных узлов. Однородность разностной схемы. Использование КГД системы для построения конечно-разностной схемы. Искусственная диссипация. Пример постановки задачи численного моделирования течения за обратным уступом.
- 7.Способ построения разностной аппроксимации уравнений газовой динамики на треугольных неструктурированных сетках. Построение разностной схемы.
- 8.Уравнение Больцмана. БГК приближение. Построение моментных уравнений. Равновесная функция распределения и уравнения Эйлера. Функция распределения Навье-Стокса и уравнения Навье-Стокса.
- 9.Кинетический вывод квазигазодинамических уравнений. Модельное кинетическое уравнение. Пример построения КГД системы для одномерного плоского течения. Представление КГД уравнений в виде законов сохранения.
- Коэффициенты вязкости и теплопроводности.
- 10.Способы построения моментных уравнений для неравновесных течений: Неравновесность между поступательной и вращательной степенями свободы.
- Обменные слагаемые в уравнении энергии.
- 11.Моментные уравнения для двухкомпонентной смеси газов. Обменные слагаемые в уравнении импульса и энергии.

12. Уравнения Навье-Стокса для вязких несжимаемых течений. Теорема о диссипации кинетической энергии. Диссипативная функция. Приближение Буссинеска. Вид уравнений для плоского двумерного течения. Примеры точных решений – закон Архимеда, течения Куэтта и Пуа-зейля для плоского канала.

13. Численное решение уравнений Навье-Стокса для вязкой несжимаемой жидкости. Естественные переменные и переменные «функция тока – вихрь скорости». Уравнения Пуассона для давления и функции тока. Особенности постановки граничных условий. Пример постановки задачи численного моделирования течения в каверне.

14. Физический смысл уравнений в приближении мелкой воды. Уравнения мелкой воды как баротропное приближение уравнений Эйлера. Число Фруда и аналогия с газодинамическими течениями. Условие гидростатического равновесия.

15. Задача о прыжке воды и задачи о распаде разрыва. Автомодельные решения. Численные аппроксимации уравнений мелкой воды. Моделирование течений с зонами сухого дна. Регуляризованные уравнения как основа для численных алгоритмов решения уравнений мелкой воды.

Критерии оценивания

Оценка отлично (10) 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) 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) выставляется студенту, показавшему 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) 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) 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) 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) 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) 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) 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) 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

Дифференцированный зачет может проводиться по итогам текущей успеваемости и сдачи заданий и других видов работ, предусмотренных программой дисциплины и (или) путем организации специального опроса, проводимого в устной и (или) письменной форме.

При проведении дифференцированного зачета обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Опрос обучающегося по билету на дифференцированном зачете не должен превышать одного астрономического часа.