

Утверждена
Ученым советом
ИПМ им. М.В. Келдыша РАН,
протокол № _____ от « ____ » _____ 202__ г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Введение в механику жидкости и газа
и вычислительную газовую динамику

1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

Форма обучения

очная

Москва, 2026

Научная специальность: 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

Дисциплина: Введение в механику жидкости и газа и вычислительную газовую динамику

Форма обучения: очная

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА РЕКОМЕНДОВАНА

Ученым советом ИПМ им. М.В. Келдыша РАН,

протокол № _____ от « ____ » _____ 202__ г.

ИСПОЛНИТЕЛИ (разработчики программы):

Савенков Е.Б., член-корр. РАН, д.ф.-м.н., зам. директора ИПМ им. М.В. Келдыша РАН – Раздел 1

Абалакин И.В., к.ф.-м.н., ст. научный сотрудник ИПМ им. М.В. Келдыша РАН – Раздел 2

Козубская Т.К., д.ф.-м.н., гл. научный сотрудник ИПМ им. М.В. Келдыша РАН (отв.) – Раздел 3

Дубень А.П., к.ф.-м.н., ст. научный сотрудник ИПМ им. М.В. Келдыша РАН – Раздел 4

Заведующий аспирантурой _____

Меньшов И.С.

Оглавление

АННОТАЦИЯ	4
1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ	4
2. ТРЕБОВАНИЯ К РЕЗУЛЬТАТАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ	4
3. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ	5
3.1. Структура дисциплины.....	5
3.2. Содержание разделов дисциплины	5
3.3. Семинарские занятия.....	7
4. ТЕКУЩАЯ И ПРОМЕЖУТОЧНАЯ АТТЕСТАЦИЯ. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ.....	8
5. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ.....	10
6. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ	10

АННОТАЦИЯ

Дисциплина «Введение в механику жидкости и газа и вычислительную газовую динамику» реализуется в рамках Блока «Образовательный компонент» основной профессиональной образовательной программы высшего образования – программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре Федерального исследовательского центра «Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН (ИПМ им. М.В. Келдыша РАН).

Рабочая программа разработана и составлена на основании Федеральных государственных требований к структуре программ подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре к условиям их реализации, срокам освоения этих программ с учетом различных форм обучения, образовательных технологий и особенностей отдельных категорий аспирантов (адъюнктов), в соответствии с учебными планами подготовки аспирантов в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН по научной специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Основным источником материалов для формирования содержания программы являются: материалы конференций, симпозиумов, семинаров, Интернет-ресурсы, научные издания и монографические исследования и публикации.

Общая трудоемкость дисциплины по учебному плану составляет 2 зач. ед. (72 часа), из них лекций – 24 часа, семинарских занятий – 8 часа, практических занятий – 0 часов и самостоятельной работы – 40 часа. Дисциплина реализуется на 1-м курсе, во 2-м семестре, продолжительность обучения – 1 семестр.

Текущая аттестация проводится не менее 2 раз в соответствии с заданиями и формами контроля, предусмотренные настоящей программой.

Промежуточная оценка знания осуществляется в период зачетно-экзаменационной сессии в форме зачета с оценкой.

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Цели и задачи дисциплины

«Введение в механику жидкости и газа и вычислительную газовую динамику»

Цель: освоение фундаментальных знаний и компетенций, которые позволят представлять математические модели механики жидкости и газа свойств на основе гиперболических законов сохранений, выбирать из них наиболее корректную модель для той или иной задачи, ставить вычислительную постановку и разрабатывать дискретные версии выбранной модели, иметь представление о численных методах решения систем дискретных уравнений, численно описывающих газодинамические процессы.

Задачи:

- освоить базовые понятия механики жидкости и газа и вычислительной газовой динамики;
- уметь на практике применять освоенные знания при использовании математического и численного анализа;
- уметь самостоятельно ставить и решать задачи по освоенной дисциплине

2. ТРЕБОВАНИЯ К РЕЗУЛЬТАТАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Процесс изучения дисциплины «Введение в механику жидкости и газа и вычислительную газовую динамику» направлен на формирование следующих определённых умений, знаний, компетенций:

а) универсальные (УК): не предусмотрено

б) общепрофессиональных (ОПК): не предусмотрено.

в) профессиональных (ПК): способность строить и исследовать математических модели для описания газодинамических течений, формулировать физическую, математическую и вычислительные задачи, разрабатывать численные методы решения задачи, строить итоговый вычислительный алгоритм.

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

Знать:

- основные понятия механики жидкости и газа;
- основные понятия вычислительной газовой динамики.

Уметь:

- использовать полученные теоретические знания при решении практических задач.

Владеть:

- основными методами и подходами в численном исследовании физических сред в механике жидкости и газа

Приобрести опыт:

- построения математических моделей механики сплошной среды применительно к практическим задачам;
- проведения численных расчетов задач вычислительной газовой динамики.

3. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

3.1. Структура дисциплины

Распределение трудоемкости дисциплины по видам учебных работ

Вид учебной работы	Трудоемкость	
	общая	
	зач.ед.	час.
ОБЩАЯ ТРУДОЕМКОСТЬ по Учебному плану	2	72
Лекции (Л)		24
Практические занятия (ПЗ)		0
Семинары (С)		8
Самоподготовка (проработка и повторение лекционного материала и материала, учебников и учебных пособий, подготовка к семинарским и практическим занятиям) и самостоятельное изучение тем дисциплины		40
<i>Вид контроля: зачет с оценкой</i>		

3.2. Содержание разделов дисциплины

Общее содержание дисциплины

№ раздела	Наименование раздела	Содержание раздела	Форма текущей аттестации
1.	Математические модели в механике жидкости и газа	Введение. Основные способы построения моделей механики сплошной среды и гидродинамики: кинетический и феноменологический подход. Движение среды. Законы сохранения	О, ДЗ

2.	Свойства гиперболических систем дифференциальных уравнений	Линейное уравнение переноса. Система гиперболических уравнений. Уравнение Бюргерса. Разрывные решения. Система уравнений Эйлера сжимаемого газа. Ударные волны и волны разрежения	О, ДЗ
3.	Введение в численные методы решения задач механики жидкости и газа	Введение в методы решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений Базовые понятия численных методов. Главные схемы вычислительной газовой динамики Конечно-разностные схемы высокого порядка. Нелинейные дифференциальные уравнения Задача о распаде разрыва (задача Римана). Схема Годунова для линейного уравнения переноса. Схема Годунова для невязкого уравнения Бюргерса Сетки. Вершинно-центрированные и объёмно-центрированные численные методы. Введение в метод конечных объёмов. Понятие о квазиодномерных методах	О, ДЗ
4.	Введение в моделирование турбулентных течений	Турбулентность: понятие, характеристики, закономерности. Канонические турбулентные течения. Методы расчета турбулентных течений. Осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса и полуэмпирические модели турбулентности (RANS). Вихреразрешающие подходы. Метод Моделирование крупных вихрей (LES). Гибридные RANS-LES подходы.	О, ДЗ

Примечание: О – опрос, Д – дискуссия (диспут, круглый стол, мозговой штурм, ролевая игра), ДЗ – домашнее задание (эссе и пр.). Формы контроля не являются жесткими и могут быть заменены преподавателем на другую форму контроля в зависимости от контингента обучающихся. Кроме того, на занятиях семинарских может проводится работа с нормативными документами, изданиями средств информации и прочее, что также оценивается преподавателем.

3.3. Лекционные занятия

№ занятия	№ раздела	Краткое содержание темы занятия	Кол-во часов
1-3	1	Понятие сплошной среды. Движение сплошной среды. Эйлеровы и лагранжевы координаты. Абстрактный закон сохранения. Консервативная величина и ее поток. Интегральная и дифференциальная формулировка абстрактного закона сохранения. Основные консервативные величины. Законы сохранения массы, энергии, импульса, момента импульса. Формулировка законов сохранения как системы уравнений. Консервативные и первичные (они же примитивные, они же физические) переменные. Определяющие соотношения. Определяющие соотношения: твердые тела, жидкости и газы. Скоростные среды. Определяющие соотношения для описания динамики вязкого сжимаемого газа. Тензор вязких напряжений. Давление.	6

		Уравнение состояния.	
4-6	2	<p>Характеристики. Начально-краевая задача. Система 1D гиперболических линейных уравнений. Диагонализация. Краевая задачи для системы. Различные формы записи системы 1D нелинейных гиперболических уравнений. Линеаризация. Замечание о многомерных системах уравнений.</p> <p>1D невязкое уравнение Бюргерса. Разрывные решения. Энтропийное условие.</p> <p>Уравнения состояния идеального газа. Характеристики 1D системы уравнений Эйлера сжимаемого газа. Соотношения Рэнкина-Гюгонио на разрыве. Классификация разрывов. Адиабаты Пуассона и Гюгонио. Задача о поршне. Распад произвольного разрыва.</p>	6
7-9	3	<p>Смысл численного решения системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных. Требования к численным методам</p> <p>Введение в методы решения ОДУ и систем ОДУ. Дифференциальная задача и разностная схема. Ошибка численного решения, аппроксимация с порядком k, невязка, устойчивость, сходимость</p> <p>Схема «уголок» для уравнения переноса. Схемы «левый уголок» и «правый уголок», их отличия. Критерий Куранта-Фридрихса-Леви, число Куранта.</p> <p>Метод линий. Полудискретная схема</p> <p>Конечно-разностные схемы высокого порядка. Шаблон аппроксимации</p> <p>Эффект Гиббса. Монотонность линейных схем. Теорема Годунова</p> <p>Нелинейные дифференциальные уравнения на примере невязкого уравнения Бюргерса. Разностный закон сохранения. Разрывные решения невязкого уравнения Бюргерса: бегущий скачок и волна разрежения. Физически верные решения. Консервативность разностной схемы. Численный поток. Энтропийное условие. Теорема Хартена</p> <p>Задача о распаде разрыва, или задача Римана. Идея схемы Годунова. Схема Годунова для линейного уравнения переноса. Схема Годунова для невязкого уравнения Бюргерса</p> <p>Структурированные и неструктурированные сетки. Вершинно-центрированные и объёмно-центрированные численные методы.</p> <p>Введение в метод конечных объёмов. Общая формулировка метода конечных объёмов для вершинно-центрированной и объёмно-центрированной схем.</p> <p>Понятие о квазиодномерных методах на примере EBR схем</p>	6
10-12	4	<p>Устойчивость течений к малым возмущениям: бесконечно малые возмущения и пределы малости возмущений, при которых работает линейная теория. Случайное поведение мгновенных полей и устойчивые к малым возмущениям интегральные характеристики.</p> <p>Однородная изотропная турбулентность: минимальный пространственный масштаб, инерционный интервал.</p> <p>Турбулентный пограничный слой. Ламинарно-турбулентный переход при обтекании пластины. Турбулентное течение в</p>	6

		плоском или круглом канале. Математическая модель, предъявляемые к ней требования. Прямое численное моделирование уравнений Навье – Стокса, его вычислительная сложность. Уравнения Рейнольдса (осреднённые по Рейнольдсу уравнения Навье – Стокса). Гипотеза Буссинеска. Модели турбулентности как замыкания уравнений Рейнольдса. Вихреразрешающее моделирование, подсеточные модели турбулентности. Гибридные подходы.	
ВСЕГО			24

3.4. Семинарские занятия

№ занятия	№ Раздела (темы)	Краткое содержание темы занятия	Кол-во часов
13	1	Среды скоростного типа. Уравнения движения жидкости и газа. Тензор вязких напряжений, закон Фурье Обсуждение пройденного материала. Вопросы и ответы по содержанию лекций	2
14	2	Обсуждение пройденного материала. Вопросы и ответы по содержанию лекций	2
15	3	Обсуждение пройденного материала. Вопросы и ответы по содержанию лекций	2
16	4	Обсуждение пройденного материала. Вопросы и ответы по содержанию лекций	2
ВСЕГО			8

4. ТЕКУЩАЯ И ПРОМЕЖУТОЧНАЯ АТТЕСТАЦИЯ. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

Текущая и промежуточная аттестации аспирантов проводятся в соответствии с локальным актом ИПМ им. М.В. Келдыша РАН – «Положение о текущей и промежуточной аттестации аспирантов Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН» (ИПМ им. М.В. Келдыша РАН) и являются обязательными.

Текущая аттестация по дисциплине проводится в форме опроса, а также оценки вопроса-ответа в рамках участия обучающихся в дискуссиях и различных контрольных мероприятиях по оцениванию фактических результатов обучения, осуществляемых преподавателем, ведущим дисциплину. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины см. ниже.

Объектами оценивания выступают:

- учебная дисциплина – активность на занятиях, своевременность выполнения различных видов заданий, посещаемость занятий;
- степень усвоения теоретических знаний и уровень овладения практическими умениями и навыками по всем видам учебной работы, проводимых в рамках семинаров, практических занятий и самостоятельной работы.

Оценивание обучающегося на занятиях осуществляется с использованием нормативных оценок зачета с оценкой.

Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины

Форма контроля знаний	Вид аттестации	Примечание
-----------------------	----------------	------------

Проверочные работы в течение всего курса	Текущая	Ниже приведены перечни рекомендуемых задач и контрольных вопросов
Зачет с оценкой	Итоговая	

Примерный **перечень рекомендуемых контрольных вопросов** для оценки текущего уровня успеваемости студента:

1. Эйлеровый и лагранжевый способ описания движения среды.
2. Абстрактный закон сохранения для скалярной и векторной величины.
3. Понятие вектора/тензора потока консервативной величины.
4. Система законов сохранения массы, импульса и энергии.
5. Понятие о системе определяющих соотношений. Уравнение состояния.
6. Уравнения гидродинамики.
7. Волновой характер и характеристики гиперболической системы уравнений.
8. Разрывное решение невязкого уравнения Бюргерса и энтропийное условие.
9. Различные формы записи одномерной системы уравнений Эйлера для сжимаемого газа.
10. Простые волны. Ударная волна.
11. Невозможность существования волн разрежения в газовой динамике.
12. Характерные конфигурации в решении задачи о произвольном разрыве.
13. Однородная изотропная турбулентность: минимальный пространственный масштаб, инерционный интервал. Когерентные вихревые структуры.
14. Турбулентный пограничный слой. Ламинарно-турбулентный переход при обтекании пластины. Турбулентное течение в плоском канале.
15. Энергетический спектр. Классификация подходов к моделированию турбулентных течений. Разрешаемые и моделируемые масштабы.
16. Прямое численное моделирование уравнений Навье – Стокса, его вычислительная сложность.
17. Уравнения Рейнольдса (осреднённые по Рейнольдсу уравнения Навье – Стокса). Гипотеза Буссинеска. Модели турбулентности как замыкания уравнений Рейнольдса.
18. Вихререшающее моделирование, подсеточные модели турбулентности. Отфильтрованные уравнения Навье-Стокса. Гибридные подходы.

Примерный **перечень рекомендуемых контрольных задач** для оценки текущего уровня успеваемости студента:

1. Сформулировать связь между пространственными и материальными координатами точки среды.
2. Привести примеры консервативных и неконсервативных величин.
3. Вывести локальную (дифференциальную) форму закона сохранения, исходя из его интегральной формы.
4. Решение начально-краевой задачи для линейного уравнения переноса.
5. Решение начальной для 1D для линейной гиперболической системы уравнений.
6. Решение невязкого уравнения Бюргерса с кусочно-постоянными начальными условиями.
7. Вывести уравнения Рейнольдса из несжимаемых уравнений Навье-Стокса
8. Определить необходимое сеточное разрешение для пограничного слоя в зависимости от числа Рейнольдса.
9. Определить размеры шагов сетки для расчета развитого турбулентного течения в канале в рамках RANS, LES, DNS для заданного числа Рейнольдса.

Промежуточная аттестация (итоговый контроль знаний по дисциплине) осуществляется в **форме дифференцированного зачета** в период зачетно-экзаменационной сессии в соответствии с Графиком учебного процесса. Обучающийся допускается к зачету в случае выполнения аспирантом всех учебных заданий и мероприятий, предусмотренных настоящей программой. В случае наличия учебной задолженности (пропущенных занятий и (или) невыполненных заданий) аспирант отрабатывает пропущенные занятия и выполняет задания.

Оценивание аспиранта на промежуточной аттестации в форме зачета с оценкой:

Оценка	Требования к знаниям и критерии выставления оценок
Незачет	Основное содержание учебного материала не раскрыто; допущены грубые ошибки в определении понятий и при использовании терминологии; не даны ответы на дополнительные вопросы.
Зачет с оценкой «3», «4» или «5»	Раскрыто содержание материала, даны корректные определения понятий; допускаются незначительные нарушения последовательности изложения; допускаются небольшие неточности при использовании терминов или в логических выводах; при неточностях задаются дополнительные вопросы. Та или иная оценка ставится принимающим зачет преподавателем (преподавателями) в зависимости от качества ответа и глубины знаний

5. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Основная литература

1. Овсянников, Лев Васильевич. Лекции по основам газовой динамики: учеб. пособие для студентов механико-мат. специальностей ун-тов / Л. В. Овсянников. — Изд. 2-е, доп. — Москва, Ижевск : Ин-т компьютер. исслед., 2003. — 335 с. : ил., табл. — ISBN 5-93972-201-6 (в пер.).
2. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики: 5-е изд., стер. — М: Наука, 1977.
3. Рождественский Б.Л., Яненко Н.Н. Системы квазилинейных уравнений и их приложения к газовой динамике: 2-е изд., перераб. и доп. — М: Наука, 1978.
4. Самарский А.А., Попов Ю.П. Разностные методы решения задач газовой динамики: 3-е изд., доп. — М: Наука, 1992.
5. Куликовский А. Г., Погорелов Н. В., Семенов А. Ю. Математические вопросы численного решения гиперболических систем уравнений — 2-е изд., испр. и доп. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012.

1. Белов И.А., Исаев С.А. Моделирование турбулентных течений. Санкт-Петербург, БГТУ, 2001.
2. Лапин Ю.В. Статистическая теория турбулентности.
3. А.В. Гарбарук, М.Х. Стрелец, А.К. Травин, М.Л. Шур. Современные подходы к моделированию турбулентности: учебное пособие. СПб: Изд-во Политехнического университета, 2016.
4. Снегирёв А.Ю. Высокопроизводительные вычисления в технической физике. Численное моделирование турбулентных течений. СПб: Изд-во Политехнического университета, 2009.

Дополнительная литература и Интернет-ресурсы

1. А.В. Гарбарук. Моделирование турбулентности. <https://cfd.spb.ru/agarbaruk/>

6. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Для обеспечения интерактивных методов обучения для чтения лекций требуется аудитория с мультимедиа (возможен вариант с интерактивной доской).

Для проведения семинарских занятий в очном формате требуются аудитории с доской и флюмастерами.

ИСПОЛНИТЕЛИ (разработчики программы):

Савенков Е.Б., член-корр. РАН, д.ф.-м.н., зам. директора ИПМ им. М.В. Келдыша РАН
Абалакин И.В., к.ф.-м.н., ст. научный сотрудник ИПМ им. М.В. Келдыша РАН
Козубская Т.К., д.ф.-м.н., гл. научный сотрудник ИПМ им. М.В. Келдыша РАН (отв.)
Дубень А.П., к.ф.-м.н., ст. научный сотрудник ИПМ им. М.В. Келдыша РАН