

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
«ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ ИМ. М.В. КЕЛДЫША  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»**

---

**Утверждена**  
Ученым советом  
ИПМ им. М.В. Келдыша РАН,  
протокол № 14-22 от «10» ноября 2022 г.

# **РАБОЧАЯ ПРОГРАММА**

## **УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

Численные методы динамики газов и неравновесного переноса частиц

1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

**Форма обучения**

очная

Москва, 2022

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

**Дисциплина:** Численные методы динамики газов и неравновесного переноса частиц.

**Форма обучения:** очная

## **РАБОЧАЯ ПРОГРАММА РЕКОМЕНДОВАНА**

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

протокол № 14/22 от «10» ноября 2022 г.

**ИСПОЛНИТЕЛЬ** (разработчик программ):

Шильков А.В., к.ф.м.н., старший научный сотрудник ИПМ им. М.В.Келдыша РАН

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
<b>3.1. Структура дисциплины .....</b>	<b>5</b>
<b>3.2. Содержание разделов дисциплины.....</b>	<b>5</b>
<b>3.3. Семинарские занятия.....</b>	<b>7</b>
4. ТЕКУЩАЯ И ПРОМЕЖУТОЧНАЯ АТТЕСТАЦИЯ. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ .....	8
5. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ.....	10
6. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ .....	10

## АННОТАЦИЯ

Дисциплина «Численные методы динамики газов и неравновесного переноса частиц» 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 – 4 часа, семинарских занятий – 8 часов, практических занятий – 0 часов и самостоятельной работы – 60 часа. Дисциплина реализуется на 1-м курсе, в 1-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.

### 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

**Цели и задачи дисциплины «Численные методы динамики газов и неравновесного переноса частиц»**

**Цель:** освоение фундаментальных знаний и компетенций, которые позволят представлять и разрабатывать методами математического и численного анализа модели течения вязкого сжимаемого газа и вязкой несжимаемой жидкости а также владеть математическим аппаратом, позволяющим выбрать наиболее правильную модель, аналитически исследовать и оценивать её свойства.

**Задачи:**

- освоить основы динамики газов и неравновесного переноса частиц;
- практическое освоение накопленных по дисциплине знаний при использовании математического и численного анализа;
- стимулирование к самостоятельной деятельности по освоению дисциплины.

### 2. ТРЕБОВАНИЯ К РЕЗУЛЬТАТАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Процесс изучения дисциплины «Численные методы динамики газов и неравновесного переноса частиц» направлен на формирование определённых умений, знаний, компетенций.

**а) универсальные (УК):** не предусмотрено

**б) общепрофессиональных (ОПК):** не предусмотрено.

**в) профессиональных (ПК):** способность построения и исследования математических моделей для описания параметров потоков движущихся сред в широком диапазоне условий (ПК-1).

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

**Знать:**

- основные понятия численных методов;
- основные понятия динамики газов
- основные понятия неравновесного переноса частиц.

**Уметь:**

- использовать основные понятия численных методов газовой динамики газовой динамики;
- использовать полученные теоретические знания при решении практических задач.

**Владеть:**

- основными методами и подходами в исследовании процессов, протекающих в динамике газов и неравновесном переносе частиц.

**Приобрести опыт:**

- построения моделей газовой динамики с помощью методов математического анализа;
- проведения численных расчетов газовой динамики.

**СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ****3.1. Структура дисциплины****Распределение трудоемкости дисциплины по видам учебных работ**

Вид учебной работы	Трудоемкость	
	общая	
	зач.ед.	час.
<b>ОБЩАЯ ТРУДОЕМКОСТЬ</b> по Учебному плану	<b>2</b>	<b>72</b>
Лекции (Л)		<b>4</b>
Практические занятия (ПЗ)	-	-
Семинары (С)		<b>8</b>
Самоподготовка (проработка и повторение лекционного материала и материала учебников и учебных пособий, подготовка к семинарским и практическим занятиям) и самостоятельное изучение тем дисциплины		<b>60</b>
<b>Вид контроля: зачет</b>		

**3.2. Содержание разделов дисциплины****Общее содержание дисциплины**

№ раздела	Наименование раздела	Содержание раздела	Форма текущей аттестации
1.	Введение	Введение. Историческая справка о развитии математических моделей для описания течений жидкости и газа. Вывод уравнений газовой Динамики на основе законов сохранения: Процедура осреднения. Пространственные и пространственно-временные средние. Уравнение неразрывности. Преобразование Галилея. Интегральные законы сохранения. Переход к дифференциальным уравнениям. Диссипативный характер уравнений.	О, ДЗ
2.	Уравнения Навье-Стокса, Эйлера	Классический способ замыкания – уравнения Навье-Стокса. Уравнения Эйлера. Нетрадиционный способ замыкания – квазигидродинамическая и квазигазодинамическая (КГД) системы. Вектор плотности потока массы и параметр релаксации. Барометрическая формула Лапласа. Дивергентный и недивергентный вид уравнений. Преобразование Галилея на примере одномерного течения.	О, ДЗ

3.	Численные алгоритмы решения одномерных задач	Численные алгоритмы решения одномерных задач газовой динамики: Разностная аппроксимация одномерных нестационарных уравнений. Пример вязкого течения – задача о структуре ударной волны. Условия Рэнкина-Гюонио. Расчет на основе уравнений Навье-Стокса и КГД системы. Сравнение с экспериментом для одноатомных газов. Введение искусственной диссипации. Пример невязкого течения - задача о распаде сильного разрыва.	О, ДЗ
4.	Двумерные задачи газовой динамики	Двумерные задачи газовой динамики и численные алгоритмы их решения: Запись уравнений в декартовой системе координат. Задача о течении газа в канале. Начальные и граничные условия. Пример точного решения – течение Куэтта. Безразмерный вид уравнений. Упрощенные формы уравнений газовой динамики. Задача Блазиуса и приближение Прандтля. Параболизованные уравнения. Приближение Стокса.	О, ДЗ
5.	Разностные алгоритмы решения	Разностные алгоритмы решения 2Д уравнений газовой динамики. Запись уравнений в потоковом виде и метод контрольного объема. Численное решение уравнений на прямоугольных сетках. Аппроксимация граничных условий с помощью фиктивных узлов. Искусственная диссипация. Особенности численного моделирования дозвуковых течений. Неотражающие граничные условия на свободных границах. Численное решение уравнений газовой Динамики в областях сложной формы. Неструктурированные сетки и построение численного алгоритма. Примеры расчетов – нестационарное течение в канале со ступенькой. Течение в окрестности цилиндрического торца. Параметры торможения. Течение за обратным уступом. Течение в следе за цилиндром. Дорожка Кармана.	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 проводиться 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.	1,2,3	Историческая справка о развитии математических моделей для описания течений жидкости и газа. Классический способ замыкания – уравнения Навье-Стокса. Уравнения Эйлера. Численные алгоритмы решения одномерных задач газовой динамики: разностная аппроксимация одномерных нестационарных уравнений.	2
2.	4,5	Двумерные задачи газовой динамики и численные алгоритмы их решения. Разностные алгоритмы решения 2Д уравнений газовой динамики.	2
<b>ВСЕГО</b>			<b>4</b>

### 3.4. Семинарские занятия

№ занятия	№ Раздела (темы)	Краткое содержание темы занятия	Кол-во часов
3.	1	Вывод уравнений газовой Динамики на основе законов сохранения: Процедура осреднения. Пространственные и пространственно-временные средние.	2
4.	2,3	Нетрадиционный способ замыкания – квазигидродинамическая и квазигазодинамическая (КГД) системы. Вектор плотности потока массы и параметр релаксации.	2
5.	4	Задача Блазиуса и приближение Прандтля. Параболизованные уравнения. Приближение Стокса.	2
6.	5	Примеры расчетов – нестационарное течение в канале со ступенькой. Течение в окрестности цилиндрического торца. Параметры торможения.	2
<b>ВСЕГО</b>			<b>8</b>

## 4. ТЕКУЩАЯ И ПРОМЕЖУТОЧНАЯ АТТЕСТАЦИЯ. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

**Текущая аттестация аспирантов.** Текущая аттестация аспирантов проводится в соответствии с локальным актом ИПМ им. М.В. Келдыша РАН - Положением о текущей, промежуточной и итоговой аттестации аспирантов ИПМ им. М.В. Келдыша РАН по программам высшего образования – программам подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре и является обязательной.

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 зачет, незачет.

**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	итоговая	

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

1. Вывод уравнений газовой динамики на основе законов сохранения.
2. Уравнение неразрывности.
3. Преобразование Галилея.
4. Интегральные законы сохранения.
5. Переход к дифференциальным уравнениям.
6. Диссипативный характер уравнений.
7. Классический способ замыкания – уравнения Навье-Стокса.
8. Уравнения Эйлера.
9. Нетрадиционный способ замыкания – квазигидродинамическая и квазигазодинамическая (КГД) системы.
10. Вектор плотности потока массы и параметр релаксации.
11. Барометрическая формула Лапласа.
12. Дивергентный и недивергентный вид уравнений.
13. Преобразование Галилея на примере одномерного течения.
14. Численные алгоритмы решения одномерных задач газовой динамики: Разностная аппроксимация одномерных нестационарных уравнений.
15. Пример вязкого течения – задача о структуре ударной волны.
16. Условия Рэнкина-Гюгонио.
17. Расчет на основе уравнений Навье-Стокса и КГД системы.
18. Сравнение с экспериментом для одноатомных газов.
19. Введение искусственной диссипации.
20. Пример невязкого течения - задача о распаде сильного разрыва.

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

1. Вычислить поток и плотность потока импульса излучения через заданную поверхность.
2. Определить интенсивность выходящего из плоского слоя излучения.
3. Сформулировать критерии справедливости приближения квазистационарности поля излучения.
4. Оценить возможность пренебречь радиационным давлением в уравнении движения излучающего газа.

**Итоговая аттестация аспирантов.** Итоговая аттестация аспирантов по дисциплине проводится в соответствии с локальным актом ИПМ им. М.В. Келдыша РАН – Положением о текущей, промежуточной и итоговой аттестации аспирантов ИПМ им. М.В. Келдыша РАН по программам высшего образования – программам подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре и является обязательной.

Итоговая аттестация по дисциплине осуществляется в форме зачета в период зачетно-экзаменационной сессии в соответствии с Графиком учебного процесса по приказу (распоряжению заместителю директора по научной работе). 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 обучающегося на промежуточной аттестации осуществляется с использованием нормативных оценок на зачете – зачет, незачет.



## Оценивание аспиранта на промежуточной аттестации в форме зачета

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	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.

### 5. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

#### *Основная литература*

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. Москва, Наука, 1986
2. Берд Г.А. Молекулярная газовая динамика. Москва, 1981
3. Самарский А.А. Теория разностных схем. Москва, 1987
4. Самарский А.А., Попов Ю.П. Разностные методы решения задач газовой динамики. Москва, 1980

#### *Дополнительная литература и Интернет-ресурсы*

1. Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П. Физическая кинетика т.10. Москва, Физматлит, 2002
2. Калиткин Н.Н. Численные методы. М., Наука, 1978
3. Шеретов Ю.В. Динамика сплошных сред при пространственно—временном осреднении. М.—Ижевск:НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2009
4. Шеретов Ю.В. Математические модели гидродинамики. Учебное пособие. Тверь, Тверской гос. Университет, 2004
5. Елизарова Т.Г. Квазигазодинамические уравнения и методы расчета вязких течений. Москва, Научный мир, 2007 , <http://elizarova.imamod.ru/>.

### 6. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

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

Для проведения дискуссий и круглых столов, возможно, использование аудиторий со специальным расположением столов и стульев.

**ИСПОЛНИТЕЛИ** (разработчики программы):

Шильков А.В. , ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.