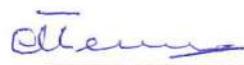


Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Объединенный институт высоких температур Российской академии наук
(ОИВТ РАН)

Принято на Ученом совете
ОИВТ РАН
Протокол №3 от 11.06.2025

«Утверждаю»
Директор ОИВТ РАН

 академик Петров О.Ф.

« 11 »  2025 год

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

Дисциплины «Гидро- и газодинамика высокотемпературных процессов»

направление подготовки: **01.06.01 Физика и астрономия**
(специальность –1.1.9 Механика жидкости, газа и плазмы)

Квалификация
Исследователь. Преподаватель- исследователь

Москва- 2025

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ

Целью освоения дисциплины «Гидро- и газодинамика высокотемпературных процессов» является изучение физических основ газодинамических процессов, вызванных высокоэнергетическими воздействиями.

Задачами данного курса являются:

- освоение аспирантами базовых знаний в области физической газодинамики;
- приобретение теоретических знаний в области неустойчивости и турбулентности газообразных сред, горения, детонации, высокотемпературной газодинамики;
- освоение методов построения математических моделей газодинамических процессов и получения аналитических оценок характеристик исследуемых процессов;
- приобретение навыков компьютерного моделирования при исследованиях высокотемпературных газодинамических процессов.

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОПОП АСПИРАНТУРЫ

Дисциплина «Гидро- и газодинамика высокотемпературных процессов» базируется на дисциплинах: динамика разреженных газов, распространение возмущений, термодинамика течений. Также указанная дисциплина существенно опирается на навыки математического анализа и линейной алгебры, дифференциальной геометрии, аппарата уравнений математической физики.

3. УРОВЕНЬ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

Подготовка научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре.

4. ГОД И СЕМЕСТР ОБУЧЕНИЯ (если есть)

Второй год, третий и четвертый семестры обучения.

5. ОБЪЁМ УЧЕБНОЙ НАГРУЗКИ И ВИДЫ ОТЧЁТНОСТИ.

Вариативная часть, в т.ч.:	<u>6</u> зач. Ед.
Контактная работа аспиранта с преподавателем, всего, в т.ч.:	<u>108</u> часов
лекции	<u>62</u> часов
Семинары и практические занятия	<u>46</u> часов
лабораторные работы	<u>нет</u>
индивидуальные занятия с преподавателем	<u>нет</u>
Самостоятельные занятия	<u>108</u> часов

ВСЕГО	6 зач. Ед., 216 часов

6. КОНКРЕТНЫЕ ЗНАНИЯ, УМЕНИЯ И НАВЫКИ, ФОРМИРУЕМЫЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

В результате освоения дисциплины «Гидро- и газодинамика высокотемпературных процессов» обучающийся должен:

1. Знать:

- фундаментальные понятия, законы, теории классической и современной физики;
- порядки численных величин, характерные для различных разделов физики;
- современные проблемы физики, химии, математики;
- теоретические модели фундаментальных процессов и явлений в физике и ее приложениях;
- постановку проблем физико-химического моделирования;
- методы компьютерного моделирования.

2. Уметь:

- абстрагироваться от несущественного при моделировании реальных физических ситуаций;
- пользоваться своими знаниями для решения фундаментальных и прикладных задач и технологических задач;
- делать правильные выводы из сопоставления результатов теории и эксперимента;
- производить численные оценки по порядку величины;
- делать качественные выводы при переходе к предельным условиям в изучаемых проблемах;
- видеть в технических задачах физическое содержание;
- осваивать новые предметные области, теоретические подходы и экспериментальные методики;
- получать наилучшие значения измеряемых величин и правильно оценить степень их достоверности;
- эффективно использовать информационные технологии и компьютерную технику для достижения необходимых теоретических и прикладных результатов.

3. Владеть:

- навыками освоения большого объема информации;
- навыками самостоятельной работы в лаборатории и Интернете;
- культурой постановки и моделирования физических задач;
- навыками грамотного сопоставления теоретических результатов с экспериментальными данными;
- практикой исследования и решения теоретических и прикладных задач;
- навыками теоретического анализа реальных задач, связанных с пожаро – взрывобезопасностью АЭС и других энергопроизводящих предприятий, инерционным термоядерным синтезом, оптимизацией сжигания газообразных горючих смесей в перспективных двигателях.

7. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Структура дисциплины

Перечень разделов дисциплины и распределение времени по темам:

№ темы и название	Количество часов
1. Основы газодинамики	54
2. Физика ударных волн	54
3. Динамика вязкой теплопроводной среды	32
4. Автомодельные течения	38
5. Тепловое излучение и лучистый теплообмен	22
6. Элементы теории горения и взрыва	16
ВСЕГО (часов)	216

Вид занятий

Лекции:

№ п.п.	Темы	Трудоёмкость (количество часов)
1		
1	Введение в газодинамику	6
2	Одномерное изоэнтропийное течение	6
3	Волны разрежения и разрывы	6
4	Фронт ударной волны	4
5	Механика и термодинамика ударного сжатия	4
6	Вязкость и теплопроводность	4
7	Задача Бюргерса.	4
8	Волны в средах с релаксацией.	4
9	Турбулентность.	4
10	Автомодельные течения.	4
11	Поиск автомодельных решений	4
12	Перенос излучения в среде	4
13	Учет процесса переноса излучения в газодинамике	4
14	Элементы теории горения и взрыва.	4
ВСЕГО (часов)		62

Семинары и практические занятия:

№ п.п.	Темы	Трудоёмкость (количество часов)
1	Базовые характеристики и соотношения газодинамики	6
2	Решение задач о плоском изоэнтропийном течении методом характеристик	6
3	Неустойчивость газодинамических разрывов	6
4	Ударная адиабата	4
5	Одномерные течения с ударными волнами и волнами разрежения	4
6	Решение задач о динамике сплошной среды в акустическом приближении	4
7	Решение уравнения Бюргерса. Эквивалентность уравнения Бюргерса уравнению теплопроводности.	4
8	Пи Теорема. Решение задач механики методом анализа размерности. Решения уравнений переноса в форме бегущей волны.	4
9	Решение задач газодинамики методом анализа размерности.	4
10	Решение задач о распространении тепла в неограниченной холодной среде от локализованного источника	4
ВСЕГО (часов)		46

Лабораторные занятия: нет

Самостоятельная работа:

№ п.п.	Темы	Трудоёмкость (количество часов)
1	- изучение теоретического курса – выполняется самостоятельно каждым студентом по итогам каждой из лекций, результаты контролируются преподавателем на лекционных занятиях, используются конспект (электронный) лекций, учебники, рекомендуемые данной программой, методические пособия.	36
2	- решение задач по заданию преподавателя – решаются задачи, выданные преподавателем по итогам лекционных занятий и сдаются в конце семестра, используются конспект (электронный) лекций, учебники, рекомендуемые данной программой, а также сборники задач, включая электронные, учебно-методические пособия.	48
3	Подготовка к экзамену	24
ВСЕГО (часов)		108

Содержание дисциплины

№ п/п	Название модулей	Разделы и темы лекционных занятий	Содержание	Объем	
				Аудиторная работа (часы)	Самостоятельная работа (часы)
1	Основы газодинамики	Введение в газодинамику	Введение. Основные положения механики сплошных сред. Базовые законы динамики сплошной среды. Понятие идеальной жидкости. Линии тока. Закон сохранения циркуляции.	12	12
		Одномерное изоэнтропийное течение	Характеристики. Основы метода характеристик. Одномерное изоэнтропийное течение. Инварианты Римана. Скорость звука. Плоское изоэнтропийное течение совершенного газа. Нелинейное уравнение переноса Римана. Анализ нелинейности. Гиперболичность уравнений газодинамики.	12	12
		Волны разрежения и разрывы	Центрированная волна разрежения. Автомодельное движение газа. Разрывы в решении задачи Римана. Условия формирования разрыва в задаче о сжатии газа поршнем. Понятие произвольного разрыва. Классификация. Тангенциальный разрыв. Контактный разрыв. Ударная волна. Условия на разрыве.	12	12
2	Физика ударных волн	Фронт ударной волны	Соотношения на фронте ударной волны. Ударная адиабата. Ударная адиабата совершенного газа с постоянной теплоемкостью. Изменение энтропии при сжатии газа в ударной волне. Природа скачка энтропии в ударной волне.	12	12
		Механика и термодинамика ударного сжатия	Геометрическая интерпретация закономерностей ударного сжатия. Механическое и термодинамическое обоснование	8	8

			устойчивости ударных волн сжатия и волн разрежения в веществе с нормальными и аномальными свойствами. Явление зеркального откола.		
3	Динамика вязкой теплопроводной среды	Вязкость и теплопроводность	Вязкость и теплопроводность среды. Вывод базовых законов движения среды с учетом вязкости и теплопроводности. Вторая вязкость. Критерии подобия Рейнольдса, Пекле и Прандтля. Поглощение звука в вязкой теплопроводной среде.	4	4
		Задача Бюргерса	Задача Бюргерса. Структура ударной волны в вязкой теплопроводной среде.	8	8
		Волны в средах с релаксацией	Волны в средах с релаксацией. Вторая вязкость. Дисперсия.	4	4
		Турбулентность.	Турбулентность. Модели турбулентности. Теория однородной изотропной турбулентности.	4	4
4	Автомодельные течения.	Автомодельные течения.	Автомодельные течения. Пи Теорема. Задача о сильном взрыве в однородной атмосфере.	8	8
		Поиск автомодельных решений	Задача о сходящейся ударной волне. Задача Рэлея о схлопывании пузырька.	8	8
5	Тепловое излучение и лучистый теплообмен	Перенос излучения в среде	Характеристики теплового излучения их связь друг с другом. Оптические характеристики вещества. Рассеяние и поглощение. Оптические характеристики вещества. Спонтанное и вынужденное испускание. Расчет характеристик равновесного излучения. Уравнение переноса излучения.	4	4
		Учет процесса переноса излучения в газодинамике	Уравнение энергии среды с учетом потерь и источников, связанных с излучением. Диффузионное приближение для расчета потока излучения. Локальное термодинамическое равновесие и приближение лучистой теплопроводности. Тепловые волны. Молекулярная и лучистая теплопроводность.	8	8
6	Элементы	Элементы	Элементы теории горения и	4	4

	теории горения и взрыва.	теории горения и взрыва.	взрыва. Основные термины и определения. Задача о тепловом взрыве. Распространение пламени.		
ВСЕГО (часов)				108	108

8. ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ УСПЕВАЕМОСТИ

Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения

Перечень контрольных вопросов для сдачи экзамена:

1. Предмет газодинамики.
2. Основные положения механики сплошных сред.
3. Понятие идеальной жидкости.
4. Линии тока.
5. Характеристики.
6. Основы метода характеристик.
7. Скорость звука.
8. Разрывы в решении задачи Римана.
9. Понятие произвольного разрыва. Классификация.
10. Тангенциальный разрыв. Условия на разрыве.
11. Контактный разрыв. Условия на разрыве.
12. Ударная волна. Условия на разрыве.
13. Возмущения с какими длинами волн растут быстрее в ходе развития гидродинамической неустойчивости.
14. Какой из механизмов гидродинамической неустойчивости развивается интенсивнее, Рэлея-Тэйлора или Кельвина-Гельмгольца?
15. Понятие потенциального течения.
16. Поведение потенциального течения вблизи поверхностей.
17. Тангенциальные разрывы в течении около объектов.
18. Центрированная волна разрежения.
19. Ударная адиабата.
20. Природа скачка энтропии в ударной волне.
21. Механическое и термодинамическое обоснование устойчивости ударных волн сжатия в веществе с нормальными свойствами.
22. Механическое и термодинамическое обоснование неустойчивости ударных волн разрежения в веществе с нормальными свойствами.
23. Механическое и термодинамическое обоснование неустойчивости ударных волн сжатия в веществе с аномальными свойствами.
24. Механическое и термодинамическое обоснование устойчивости ударных волн разрежения в веществе с аномальными свойствами.
25. Условия формирования разрыва в задаче о сжатии газа поршнем.
26. Понятие вязкости среды.
27. Понятие теплопроводности среды.
28. Природа второй вязкости.
29. Критерий Рейнольдса.
30. Критерий Пекле.
31. Условие возможности пренебрежения вязкостью и теплопроводностью.
32. Условие возможности пренебрежения вязкостью и теплопроводностью при расчете структуры ударных волн.

33. Роль вязкости в структуре фронта ударной волны.
34. Роль теплопроводности в структуре фронта ударной волны.
35. Автомодельность первого рода.
36. Приближение «серой материи».
37. Тепловые волны.
39. Вывести уравнения непрерывности и уравнения движения идеальной жидкости.
40. Вывести уравнение баланса энтропии для идеальной жидкости. Записать уравнение движения с использованием тепловой функции.
41. Вывести уравнение движения идеальной жидкости. Записать его только относительно вектора скорости.
42. Решение линейного уравнения переноса методом характеристик.
43. Одномерное изоэнтропийное течение. Уравнения. Характеристики. Инварианты Римана.
44. Плоское изоэнтропийное течение совершенного газа.
45. Нелинейное уравнение переноса Римана. Анализ нелинейности.
46. Гиперболичность уравнений газодинамики.
47. Характеристики волнового уравнения.
48. Неустойчивость Кельвина-Гельмгольца.
49. Неустойчивость Рэля-Тэйлора.
50. Неустойчивость Ландау-Дарье.
51. Вывод уравнений движения несжимаемой идеальной жидкости. Уравнение Лапласа для давления.
52. Свойства интеграла циркуляции скорости.
53. Закон сохранения циркуляции.
54. Решение задачи о равноускоренном выдвигании поршня из трубы, заполненной газом.
55. Решение задачи об истечении газа из трубы в вакуум при мгновенном удалении диафрагмы.
56. Решение задачи о равномерном выдвигании поршня из трубы.
57. Автомодельное движение газа при его истечении из трубы вслед равномерно выдвигаемому поршню.
58. Доказать невозможность существования центрированной волны сжатия.
59. Условия существования центрированной волны сжатия. Их физический смысл.
60. Соотношения на фронте ударной волны. Ударная адиабата.
61. Ударная адиабата совершенного газа с постоянной теплоемкостью.
62. Изменение энтропии при сжатии газа в ударной волне.
63. Геометрическая интерпретация закономерностей ударного сжатия. Соотношения скоростей ударной волны относительно возмущенной и невозмущенной сред и скоростей звука.
64. Геометрическая интерпретация закономерностей ударного сжатия. Изменение внутренней энергии, кинетической энергии и энтропии.
65. Доказать невозможность существования ударной волны разрежения в веществе с нормальными свойствами.
66. Соотношение для скачка энтропии в приближении ударных волн слабой интенсивности. Критерий термодинамической устойчивости ударной волны в веществе с нормальными свойствами.
67. Геометрическая интерпретация закономерностей сжатия и разрежения в веществе с аномальными свойствами. Критерий термодинамической устойчивости ударной волны разрежения.
68. На основе уравнения состояния Ван-дер-Ваальса исследовать состояние вещества вблизи критической точки жидкость-газ. Явление зеркального откола.
69. Вывод выражения для удельной силы вязкого трения в одномерном приближении.
70. Уравнение движения вязкого газа. Общий вид тензора вязких напряжений.
71. Вывод выражения для работы внутреннего трения и потоков тепла в вязкой теплопроводной среде.
72. Уравнение энергии вязкого теплопроводного газа.

73. Уравнение баланса энтропии вязкого теплопроводного газа. Роль диссипативных процессов в изменении энтропии.
74. Поглощение звука в вязкой теплопроводной среде.
75. Анализ линейного уравнения распространения звуковой волны в вязком газе.
76. Задача Бюргерса. Единый характер влияния вязкости и теплопроводности на динамику среды.
77. Уравнение Бюргерса. Автомодельное решение и его анализ.
78. Структура фронта ударной волны. Предельный случай невязкого теплопроводного газа.
79. Структура фронта ударной волны. Предельный случай нетеплопроводного вязкого газа.
80. Оценить ширину фронта ударной волны.
81. Сильный взрыв в однородной атмосфере. Законы подобия.
82. Сильный взрыв в однородной атмосфере. Постановка задачи и переход к автомодельным переменным.
83. Сильный взрыв в однородной атмосфере. Алгоритм постановки и решения задачи. Основные предположения.
84. Сильный взрыв в однородной атмосфере. Распределение параметров за взрывной волной.
85. Сильный взрыв в однородной атмосфере. Приближенное рассмотрение.
86. Задача Рэлея о схлопывании пузырька.
87. Область автомодельности решения задачи Рэлея.
38. Волны в средах с релаксацией.
88. Характеристики теплового излучения их связь друг с другом.
89. Оптические характеристики вещества. Рассеяние и поглощение.
90. Оптические характеристики вещества. Спонтанное и вынужденное испускание.
91. Расчет характеристик равновесного излучения.
92. Уравнение переноса излучения.
93. Уравнение энергии среды с учетом потерь и источников, связанных с излучением.
94. Диффузионное приближение для расчета потока излучения.
95. Локальное термодинамическое равновесие и приближение лучистой теплопроводности.
96. Тепловые волны. Молекулярная и лучистая теплопроводность.
97. Решение задачи о распространении тепла в неограниченной холодной среде от плоского источника в приближении линейной теплопроводности.
98. Решение задачи о распространении тепла в неограниченной холодной среде от плоского источника в приближении нелинейной теплопроводности.

9. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Необходимое оборудование для лекций и практических занятий: компьютер и мультимедийное оборудование (проектор), доступ к сети Интернет

10. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Основная литература

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М., Гидродинамика. - М.: Физматлит, 2015.
2. Черняк В.Г., Суетин П.Е., Механика сплошных сред. – М.: Физматлит, 2006. (Электронная библиотека МФТИ: <http://lib.mipt.ru/book/253947/?q=%D0%9C%D0%B5%D1%85%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%BA%D0%B0+%D1%81%D0%BF%D0%BB%D0%BE%D1%88%D0%BD%D1%8B%D1%85+%D1%81%D1%80%D0%B5%D0%B4>)
3. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П., Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. – М.: Физматлит, 2008.
4. Фалькович Г. Современная гидродинамика. – М.: Регулярная и хаотическая динамика, 2014.

5. Лобойко Б.Г., Диков О.Ю., Смирнов Е.Б. Сборник задач по газодинамике взрыва. 2007. 228 с. ISBN 5-902278-20-1.

Дополнительная литература:

1. Лойцанский Л.Г., Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1970.
2. Карпман В.Н., Нелинейные волны в диспергирующих средах. – М.: Наука, 1973.
3. Зельдович Я.Б., Баренблатт Г.И., Либрович В.Б., Махвиладзе Г.М., Математическая теория горения и взрыва. – М.: Наука, 1980.
4. Варнатц Ю., Маас Х., Дибба Р., Горение. – Физматлит, 2003.
5. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. – М.: Физматлит, 1987.
6. Баум Ф.С., Станюкович К.П., Шехтер, Физика взрыва, изд.3. – М.: Физматлит, 2002.
7. Иванов, М. Ф., Киверин, А. Д., Клумов, Б. А., Фортгов, В. Е. (2014). От горения и детонации к окислам азота. Успехи физических наук, 184(3), 247-264.
8. Киверин, А. Д., Яковенко, И. С. (2020). Высокоскоростные режимы распространения пламени в канале и переход к детонации. Теплофизика высоких температур, 58(4), 707-716.
9. Kiverin, A. D., Minaev, K. O., Yakovenko, I. S. (2020). Modes of mild ignition in shock tubes: Origins and classification. Combustion and Flame, 221, 420-428.
10. Киверин, А. Д., Яковенко, И. С. (2022). О роли локальных эффектов в развитии горения. Физика горения и взрыва, 58(3), 32-39.
11. Kiverin, A., Medvedkov, I., Yakovenko, I., Bykov, V. (2023). Three-dimensional structure of freely-propagating flame prior to deflagration-to-detonation transition. *Acta Astronautica*, 204, 686-691.
12. Yarkov, A. V., Kiverin, A. D., & Yakovenko, I. S. (2024). Evolution of the Boundary Layer in a Channel During Nonstationary Combustion of a Gas Mixture. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 97(7), 1751-1759.

Пособия и методические указания.

Иевлев В.М. Численное моделирование турбулентных течений. Изд. МФТИ (ГУ) 1982.

Биркгоф Г. Гидродинамика. Методы, факты, подобие. М.: Иностранная литература. 1963. 244 с.

Перечень используемых информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса, включая программное обеспечение, информационные справочные системы (при необходимости):

Язык преподавания - русский.

Программу составил Киверин А.Д., д.ф.-м.н.



«9» июня 2025г.