

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

Принято на Ученом совете  
Протокол № 8 от 23.12.2022

  
«**М.В.Верждаю**»  
Директор ОИВТ РАН  
академик Петров С.Ф.  
« 23 » 2022 год



## РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

дисциплины «**Физическая газодинамика нестационарных воздействий**»

направление подготовки: **01.06.01 Математика и механика**  
(специальность – 1.1.9 Механика жидкости, газа и плазмы).

Квалификация  
**Исследователь. Преподаватель- исследователь**

Москва- 2022

## 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ

Целью освоения дисциплины «Физическая газодинамика нестационарных воздействий» является изучение физических основ газодинамических процессов, вызванных нестационарными 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 ООП АСПИРАНТУРЫ

Дисциплина «Физическая газодинамика нестационарных воздействий» 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.

<b>Вариативная часть, в т.ч.:</b>	<u>6</u> зач. ед.
<b>Контактная работа аспиранта с преподавателем, всего, в т.ч.:</b>	<u>108</u> часов
лекции	<u>43</u> часов
Семинары и практические занятия	<u>65</u> часов
лабораторные работы	<u>нет</u>
индивидуальные занятия с преподавателем	<u>нет</u>
<b>Самостоятельные занятия</b>	<u>108</u> часов
<b>ВСЕГО</b>	<b>6 зач. ед., 216 часов</b>

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

В результате освоения дисциплины «Физическая газодинамика нестационарных воздействий 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. Математическое описание газодинамических процессов.	120

2. Высокотемпературные газодинамические процессы.	96
ВСЕГО (часов)	216

### Вид занятий

#### Лекции:

№ п.п.	Темы	Трудоёмкость (количество часов)
1	Обоснование приближения механики сплошных сред и область применения газодинамического описания среды.	2
2	Математическая модель и основные теоремы идеальной жидкости.	4
3	Модели и фундаментальные свойства вязкой жидкости.	2
4	Динамика релаксирующих сред.	2
5	Методы подобия и размерности в газовой динамике.	2
6	Неустойчивости газодинамических течений.	4
7	Элементарная теория пограничного слоя.	4
8	Турбулентные течения.	5
9	Акустические и ударные волны в газах.	8
10	Автомодельные задачи газовой динамики.	2
11	Газодинамика интенсивных импульсных воздействий.	4
12	Газодинамика горения.	4
ВСЕГО (часов)		43

#### Семинары и практические занятия:

№ п.п.	Темы	Трудоёмкость (количество часов)
1	Обоснование приближения механики сплошных сред и область применения газодинамического описания среды.	3
2	Математическая модель и основные теоремы идеальной жидкости.	6
3	Модели и фундаментальные свойства вязкой жидкости.	4
4	Динамика релаксирующих сред.	4
5	Методы подобия и размерности в газовой динамике.	6
6	Неустойчивости газодинамических течений.	8
7	Элементарная теория пограничного слоя.	4
8	Турбулентные течения.	6
9	Акустические и ударные волны в газах.	10
10	Автомодельные задачи газовой динамики.	4
11	Газодинамика интенсивных импульсных воздействий.	4
12	Газодинамика горения.	6
ВСЕГО (часов)		65

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.	35
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.	49
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	<b>I</b> Математическое описание газодинамических процессов	Обоснование приближения механики сплошных сред и область применения газодинамического описания среды.	Исторический обзор развития механики сплошных сред. Условия перехода от кинетического к гидродинамическому описанию среды. Достижения и ограничения классической газодинамической теории. Круг задач успешно решаемых с помощью газодинамического описания среды.	3	4

2		<p>Математическая модель и основные теоремы идеальной жидкости.</p>	<p>Вывод уравнений газодинамики идеальной жидкости в приближении сплошной среды. Связь с кинетическим описанием газообразных сред.</p> <p>Адиабатические процессы и уравнение переноса энтропии.</p> <p>Различные формы уравнений переноса импульса и энергии газовых сред. Характеристическое уравнение динамики идеальной жидкости. Характеристики. Введение функции энтальпии для описания переноса импульса и энергии.</p> <p>Условия отсутствия конвекции. Соотношение Бернулли. Теорема Томсона о сохранении циркуляции скорости. Потенциальные течения. Связь скорости и давления в потенциальных течениях. Свойства движения несжимаемой жидкости.</p>	12	10
3		<p>Модели и фундаментальные свойства вязкой жидкости.</p>	<p>Тензор вязких напряжений. Перенос импульса и энергии в вязкой среде. Вывод уравнений Навье - Стокса динамики вязкой жидкости. Уравнения Навье – Стокса в криволинейных координатах. Число Рейнольдса. Точные решения уравнений движений вязкой жидкости. Течение по трубе. Формулы Пуазейля и Куэтта. Приближённое уравнение Бюргерса динамики вязкой жидкости. Дисперсионное соотношение динамики вязкой жидкости. Диссипация импульса и энергии течений в вязкой среде.</p>	6	8
4		<p>Динамика релаксирующих сред.</p>	<p>Уравнение динамики релаксирующих газообразных сред. Уравнение Кортвега–де-Вриза. Солитонные решения</p>	6	6

5		Методы подобия и размерности в газовой динамике.	Структура функциональных связей между физическими величинами. Пи – теорема. Параметры, определяющие класс явлений. Применение метода размерностей для определения функциональных зависимостей, описывающих развитие процесса	8	10
6		Неустойчивости газодинамических течений.	Линеаризованные уравнения газовой динамики. Эволюция слабых возмущений. Неустойчивости газодинамических течений. Неустойчивости Релея – Тейлора и Гельмгольца. Неустойчивость Дьякова, гофрировочная неустойчивость. Неустойчивость Беннара – Релея.	12	10
7		Элементарная теория пограничного слоя.	Ламинарный пограничный слой. Система уравнений Прандтля. Решение уравнений Прандтля в безразмерных переменных. Обтекание полубесконечной пластины. Логарифмический закон распределения скоростей в пограничном слое. Структура пограничных слоёв при обтекании тел вращения.	8	8
8		Турбулентные течения.	Эволюция вихревых структур. Неустойчивость тангенциальных разрывов. Турбулентность как хаотический процесс. Основные представления хаотической динамики. Бифуркации, странные аттракторы, фрактальные структуры. Синхронизация мод. Пути перехода к хаосу. Переход к турбулентности по Рюэлю. Развитая турбулентность. Закон Колмогорова – Обухова. Инженерные модели турбулентности. Представление Рейнольдса и представление Прандтля. Алгебраическая модель, $K - \epsilon$ модель. Турбулентность как ансамбль вихревых структур.	11	10
9	<b>II</b> Высокотемпературные газодинами	Акустические и ударные волны в газах.	Акустические и ударные волны в газах. Звуковые волны. Энергия и импульс звуковых волн.	18	14

	ческие процессы		Геометрическая акустика. Распространение звука. Поглощение звука. Задача Римана о формировании волн сжатия в сжимаемой жидкости. Скачки уплотнения. Поверхности разрыва в газодинамических течениях. Конус Маха. Законы сохранения на газодинамических разрывах. Ударная адиабата. Ударные волны в газах. Структура ударной волны в газовых средах. Ударные волны слабой интенсивности. Косые ударные волны. Взаимодействие ударных волн с простейшими преградами.		
10		Автомодельные задачи газовой динамики	Автомодельные переменные. Автомодельные зависимости. Пространственные движения сплошных сред. Одномерное неустановившееся движение газа. Задача о сильном взрыве. Модель точечного взрыва. Точечный взрыв в среде с противодавлением.	6	8
11		Газодинамика интенсивных импульсных воздействий.	Газодинамическое описание высокотемпературных сред с учётом теплопроводности, испускания, поглощения и переноса излучения, ионизации, различия электронной и ионной температур, электронно – ионной релаксации. Многогрупповое приближение расчёта переноса излучения. Нелинейная теплопроводность. Ограничение тепловых потоков. Лазерный термоядерный синтез. Критерий Лоусена. Гидродинамика лазерной плазмы. Гидродинамическое описание сжатия термоядерных мишеней. Автомодельное решение идеального сжатия оболочек. Неустойчивости сжимаемых оболочек	8	10
12		Газодинамика горения.	Задача о тепловом взрыве. Математическое описание химических реакций. Теория горения Зельдовича-Франк-	10	10

			Каменецкого. Воспламенение газообразной горючей смеси. Неустойчивости горения Дарье – Ландау и диффузионная. Горение в трубах и открытом пространстве. Детонация. Точка Чепмена – Жуге. Переход горения в детонацию.		
ВСЕГО (часов)				108	108

## 8. ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ УСПЕВАЕМОСТИ

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

### Тестовые задания

№ вопроса п/п	Вопрос	Вариант ответа	Верный вариант ответа
1	Отношение каких величин определяет число Рейнольдса	1. Отношение теплопроводности к вязкости 2. Отношение инерционного члена к вязкому	Отношение инерционного члена к вязкому
2	Отношение каких величин определяет число Прандтля	1. Отношение теплопроводности к вязкости 2. Отношение температуропроводности к вязкости	Отношение температуропроводности к вязкости
3	Из какого закона сохранения выводится уравнение изменения плотности	1. Из закона сохранения Плотности 2. Из закона сохранения массы	Из закона сохранения массы
4.	Из какого закона сохранения выводится уравнение изменения скорости	1. Из закона сохранения энергии 2. Из закона сохранения импульса	Из закона сохранения импульса
5.	Из какого закона сохранения выводится уравнение изменения внутренней энергии	1. Из закона сохранения квадрата импульса 2. Из закона сохранения полной энергии	Из закона сохранения полной энергии
6.	Возмущение какой характеристики приводит к возникновению вихревой волны	1. Плотности 2. Энтропии	Энтропии
7.	Условие возникновения неустойчивости	1. Разность давлений в движущихся потоках	Разность скоростей на контактной границе

	Гельмгольца	2. Разность скоростей на контактной границе движущихся потоков	движущихся потоков
8.	Условие возникновения неустойчивости Релея-Тейлора	1. Нахождение более тяжёлой жидкости над более лёгкой 2. Противоположная направленность градиента плотности и ускорения	Противоположная направленность градиента плотности и ускорения контактирующих сред
9.	Во сколько раз можно сжать воздух в ударной волне (до начала диссоциации)	1. В десять 2. В шесть	В шесть
10.	Может ли число Маха в ударной волне быть меньше обратной величине максимального сжатия в этой волне	1. Может 2. Нет. Число Маха в ударной волне всегда больше единицы, а обратная величина максимального сжатия всегда меньше единицы	Нет. Число Маха в ударной волне всегда больше единицы, а обратная величина максимального сжатия всегда меньше единицы
11.	Какое давление должно быть в ударной волне, чтобы идеальный одноатомный газ сжать в десять раз	1. В 50 раз 2. Это не возможно, так как максимальное сжатие одноатомного газа равно четырём	Это не возможно, так как максимальное сжатие одноатомного газа равно четырём
12.	Что бы достичь сверхзвуковой скорости поток должен двигаться из сужающегося канала в расширяющийся, или наоборот	1. Должен двигаться в сужающемся канале 2. Поток должен двигаться из сужающегося канала в расширяющийся	Поток должен двигаться из сужающегося канала в расширяющийся
13.	Может ли существовать ударная волна разрежения в «нормальных» газах	1. Не существует 2. Может	Не существует
14.	Какая из адиабат Гюгонио или Пуассона, выходя из одной точки, идёт круче	1. Адиабата Гюгонио 2. Идут одинаково	Адиабата Гюгонио
15.	От каких характеристик зависит скорость истечения газа в пустоту	1. От температуры 2. От давления	От температуры
16.	С ростом скорости течения масштаб диссипации турбулентности нарастает или уменьшается	1. уменьшается 2. нарастает	уменьшается
17.	Что определяет критерий Лоусена	1. Будет ли в термоядерном реакторе	Будет ли в термоядерном реакторе положительный

		положительный выход энергии 2. Возникновение детонации	выход энергии
18.	Толщина пограничного слоя растёт или падает с ростом скорости основного потока	1. Падает как корень квадратный из скорости потока 2. Растёт	Падает как корень квадратный из скорости потока
19.	Точка Чепмена-Жуге является характеристикой ударной волны, или детонационной волны	1. Ударной волны 2. Детонационной волны	Детонационной волны
20.	Как меняется максимальная сжимаемость в ударной волне при диссоциации и ионизации	1. Растёт 2. Не меняется	Растёт

### Перечень контрольных вопросов для сдачи экзамена:

#### 1. Кинетическое и газодинамическое описание динамики газов.

Краткий ответ на вопрос:

При газодинамическом описании газов минимальный рассматриваемый объём газа должен иметь размеры много большие длины свободного пробега молекул. При этом в элементарном объёме должен выполняться принцип локального термодинамического равновесия. При кинетическом описании газов динамика среды описывается кинетическим уравнением для функции распределения частиц, при газодинамическом описании газов динамика среды описывается законами сохранения для макроскопических характеристиках газов (Основная литература [2], раздел 1.1).

#### 2. Волновое уравнение. Звуковые волны. Геометрическая акустика.

Краткий ответ на вопрос:

Звуковые волны это распространение возмущений с малыми амплитудами в газах. В силу малости возмущений динамика акустических волн описывается линейризованными уравнениями движения. Одним из таких уравнений является волновое уравнение. При этом можно считать, что акустические волны распространяются вдоль лучей. Расчёт распространения звука в таком приближении является предметом геометрической акустики ([1], §§ 64, 65, 67).

#### 3. Уравнения динамики идеальных газов. Уравнение неразрывности. Уравнения Эйлера. Уравнение переноса энергии.

Краткий ответ на вопрос:

Уравнения динамики газов следуют из законов сохранения массы, импульса и энергии газов. Для вывода уравнений динамики газов выбирается малый объём в пространстве и выписываются балансы массы, импульса и энергии потоков, втекающих и вытекающих из объёма с учётом изменения импульса и энергии на поверхности объёма ([1], §§ 1, 2, 6)

#### 4. Основные приближения при описании газодинамических течений. Стационарные течения. Потенциальные течения. Несжимаемая жидкость.

Краткий ответ на вопрос:

Стационарное течение это течение, при котором в каждой точке пространства скорость

течения остаётся постоянной во времени. В этом случае для адиабатического течения можно получить уравнение Бернулли, связывающее кинетическую энергию и энтальпию газа вдоль линий тока. Такое же соотношение можно получить для стационарных потенциальных течений ([1], §§ 5, 9, 10).

5. Законы сохранения на поверхности разрыва. Ударная волна. Ударная адиабата Гюгонио. Ударная волна в идеальном газе.

Краткий ответ на вопрос:

Ударная волна это поверхность разрыва газодинамических характеристик, связанных между собой законами сохранения массы, импульса и энергии. Ударная адиабата Гюгонио это соотношение между внутренней энергией, удельным объёмом и давлением на ударной волне. В отличие от адиабаты Пуассона, зависящей только от одной характеристики начального состояния, адиабата Гюгонио зависит от двух характеристик начального состояния. ([3], гл.1, §§13, 14. 15).

6. Ударные волны слабой интенсивности. Структура и ширина ударных волн в газах.

Краткий ответ на вопрос:

В ударной волне слабой интенсивности скачки всех газодинамических параметров можно рассматривать как малые величины и провести анализ их изменения на ударной волне, разлагая уравнение для ударной адиабаты в ряд Тейлора. В результате получаем соотношение между приростом энтропии в ударной волне и степенью сжатия в ней газа. ([3], гл.1, § 18).

7. Автомодельные течения. Задача о сильном взрыве.

Краткий ответ на вопрос:

В случае, если решение задачи зависит от некоторой комбинации, включающей параметры задачи, координаты и время, то такое решение называют автомодельным. Взрыв будем считать сильным, если можно пренебречь размерами области энерговложения и противодавлением. В этом случае задача становится автомодельной, и скорость распространяющейся ударной волны можно получить непосредственно из автомодельного соотношения, а все характеристики на ударной волне рассчитываются из обыкновенных дифференциальных уравнений ([3], гл.1, §25).

8. Характеристики. Задача Римана о распространении конечных возмущений вдоль характеристик.

Краткий ответ на вопрос:

Уравнения газовой динамики являются уравнениями гиперболического типа и имеют две действительные характеристики в  $x - t$  пространстве. Вдоль каждой характеристики сохраняются определённые соотношения между скоростью течения и определённой функцией одного из газодинамических параметров. Например, скорости звука, плотности, и т. п. Эти соотношения называются инвариантами Римана. В дозвуковых течениях в каждой точке потока пересекаются две характеристики. Приравнявая инварианты Римана каждой из этих характеристик, получаем характеристик потока в точке пространства. Сгущение характеристик приводит к формированию ударных волн. ([1], гл.10, §§ 103, 104).

9. Нелинейная эволюция простой волны.

Краткий ответ на вопрос:

Из решения задачи Римана для характеристик получаем скорость простой волны газодинамического течения, которая является нелинейной функцией. Имеющая место нелинейность приводит в процессе продвижения волны к рождению второй гармоники с

удвоенной частотой. ([1],гл.10, § 105).

10. Замкнутая система уравнений движения вязкой жидкости. Уравнение Навье-Стокса.

Краткий ответ на вопрос:

Уравнения вязкой жидкости выводятся из законов сохранения импульса и энергии с учётом вязких напряжений. Тензор вязких напряжений записывается в форме, предложенной Стоксом и обобщённой Ландау. Уравнение для скорости вязкой жидкости принято называть уравнением Навье-Стокса. В безразмерном виде уравнение Навье-Стокса зависит только от одного безразмерного параметра – числа Рейнольдса, которое определяет степень влияние на динамику газа фактора сжимаемости ([1],гл.10, §§ 15,16, 17).

11. Точные решения уравнения Навье-Стокса.

Краткий ответ на вопрос:

Получение точных решений уравнения Навье-Стокса является более сложной задачей, чем получение решений для идеальной жидкости, так как теперь наряду с первыми в уравнении присутствуют и вторые производные по координате, учитывающие силы вязкости. Точные решения удаётся получить в том случае, когда на динамику процесса не сказывается нелинейный конвективный перенос. Наиболее известны два точных решения уравнения Навье-Стокса. Течение Куэтта между плоскими бесконечными пластинами, одна из которых движется относительно другой и течение Пуазейля, когда вязкая жидкость под действием градиента давления движется между плоскими пластинами, или в цилиндрической трубе ([2],гл.6, §§ 6.3.1, 6.3.2, 6.3.3).

12. Ламинарный пограничный слой. Обтекание полубесконечной пластины.

Краткий ответ на вопрос:

В вязкой жидкости скорость на твёрдых поверхностях обращается в нуль. В результате вблизи поверхностей в тонком слое скорость меняется от скорости в потоке до нуля. Этот слой называется пограничным слоем. Теория пограничного слоя первым была построена Прандтлем. В этой теории в уравнениях газовой динамики остаются только члены с первыми порядками по величине, что упрощает решение задач, в частности, позволяет оценить зависимость толщины пограничного слоя от его протяжённости и от скорости потока. ([1],гл.4, §§ 39, 40).

13. Турбулентность как хаотический процесс. Основные представления хаотической динамики.

Краткий ответ на вопрос:

В настоящее время принято, что переход к турбулентности происходит по сценарию Рюэля-Такенса. Согласно этому сценарию при росте возмущений в среде рождаются новые гармоники с большей частотой. После рождения третьей гармоники динамическая система становится неустойчивой и процесс приобретает хаотический характер. В результате турбулентное состояние среды рассматривается как странный аттрактор и описывается методами хаотической динамики ([2],гл.8, § 8.5).

14. Неустойчивости газодинамических течений. Неустойчивости Релея – Тейлора и Гельмгольца.

Краткий ответ на вопрос:

Неустойчивость Релея-Тейлора возникает в ситуациях, когда при контакте двух сред ускорение движения и градиент плотности сред противоположно направлены. Неустойчивость Гельмгольца возникает когда на контактной границе скорости газов различны. Инкременты нарастания этих неустойчивостей получаются путём линеаризации газодинамических уравнений ([1],гл.3, §29).

15. Неустойчивости газодинамических течений.

Краткий ответ на вопрос:

При больших числах Рейнольдса стационарные решения уравнения Навье-Стокса становятся неустойчивыми, что приводит к нестационарным течениям. В линейном приближении неустойчивости носят абсолютный характер. С учётом нелинейных членов существуют пороги возникновения неустойчивостей. Для неустойчивости Гельмгольца существует вихревые условия возникновения неустойчивости. Для всех видов неустойчивостей существует энергетический критерий возникновения неустойчивости ([4], гл.2, §§2.1.1, 2.1.2, 2.1.3)

16. Развитая турбулентность. Закон Колмогорова – Обухова.

Краткий ответ на вопрос:

Если турбулентность рассматривать как однородную и изотропную, то связь между характеристиками среды можно получить из условий размерности. Если предположить, что при выбранном масштабе пульсаций турбулентность определяется только плотностью среды, энергией диссипации в единицу времени и скоростью пульсаций, то из условий размерности скорость пульсаций будет пропорциональна корню кубическому из масштаба пульсаций, в чём состоит закон Колмогорова-Обухова ([1], гл.3, § 33).

17. Газодинамическое описание высокотемпературных сред.

Краткий ответ на вопрос:

Для описания газодинамики высокотемпературных сред математическая модель учитывает диссоциацию молекул, ионизацию, разность температур между электронной и ионной компонентами, нелинейную теплопроводность, перенос излучения. Все коэффициенты переноса определяются из кинетической теории газов и плазмы ([3], гл. 6, §§ 1, 2, 3, гл. 10).

18. Уравнения газовой динамики с учётом лучистого теплообмена.

Краткий ответ на вопрос:

При высоких температурах необходим учёт переноса энергии в газах или плазмы излучением. При максимально больших интенсивностях излучения требуется также учёт плотности излучения и импульса световой волны. Для расчёта переноса излучения в газах используется диффузионное приближение. Расчёт действия интенсивного излучения в плазме проводится исходя из системы уравнений Максвелла ([3], гл. 2, §§ 1, 3, 5, 9, 10).

19. Медленное горение горючих газов.

Краткий ответ на вопрос:

Горение в горючих газовых смесях распространяется в виде волны горения. В результате экзотермической реакции на фронте волны горения выделяется энергия. Сама реакция распространяется в свежей смеси в результате теплопроводности из зоны энерговыделения и диффузии горючих компонент к фронту горения из свежей смеси. Для описания горения уравнения газовой динамики дополняются членами с теплопроводностью и уравнениями диффузии компонент смеси. Основной неустойчивостью при горении газов является неустойчивость Дарье-Ландау ([1], гл. 14, §128)

20. Детонационные волны в газах.

Краткий ответ на вопрос:

Механизм распространения горения, связанный с ударной волной называется детонацией. Ударная волна вызывает нагревание газа. Возникающее повышение температуры вызывает

экзотермическую реакцию за ударной волной. Выделяющаяся энергия в свою очередь поддерживает движение ударной волны. Расчёт соотношений на детонационной волне выполняется также, как расчёт ударной адиабаты ([1], гл. 14, § 129)

*В скобках цифрами указана необходимая для подготовки литература из списка основной литературы.*

## **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. Kiverin A.D., Yakovenko I.S. Ignition and detonation onset behind incident shock wave in the shock tube // Combust. Flame. 2019. V. 204. P.227-236.
6. Kiverin A.D., Yakovenko I.S. Intensification mechanisms of the lean hydrogen-air combustion via addition of suspended micro-droplets of water // Int. J. Hydrogen Energ. 2021. V. 46. P.1259-1272.
7. Kiverin A.D., Yakovenko I.S. Evolution of wave patterns and temperature field in shock-tube flow // Phys. Rev. Fluids. 2018. V. 3. P. 053201.
8. Kiverin A.D., Yakovenko I.S. Large-scale Dynamics of Ultra-lean Hydrogen-air Flame Kernels in Terrestrial Gravity Conditions // Int. J. Hydrogen Energ. 2021. V. 193. P.225-234.
9. Kiverin A.D., Yakovenko I.S. Combustion of heptane-in-water emulsion foamed with hydrogen-oxygen mixture // Int. J. Hydrogen Energ. 2020. V. 198. P.106230.
10. Bykov V., Kiverin A., Koshkarov A., Yakovenko I. Analysis of transient combustion with the use of contemporary CFD techniques // Comput. Fluids. 2020. V. 194. P.104310.

### **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.

**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.

**12.3 Электронные ресурсы, включая доступ к базам данных и т.д. – нет.**

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

**Язык преподавания** - русский.

Программу составил Яковенко И.С., к.ф.-м.н.



« 19 » декабря 2022г.