

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»  
(Новосибирский государственный университет, НГУ)

**Физический факультет  
Кафедра аэрофизики и газовой динамики**



ТВЕРЖДАЮ  
Декан ФФ, д.ф.-м.н  
В.Е.Блинов  
2022 г.

**Рабочая программа дисциплины**

**ВВЕДЕНИЕ В ФИЗИЧЕСКУЮ ГАЗОДИНАМИКУ**

направление подготовки: **03.03.02 Физика**  
направленность (профиль): **Общая и фундаментальная физика**

Форма обучения  
**Очная**

Семестр	Общий объем	Виды учебных занятий (в часах)				Промежуточная аттестация (в часах)				
		Контактная работа обучающихся с преподавателем			Самостоятельная работа, не включая период сессии	Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем			
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия			Консультации	Зачет	Дифференцированный зачет	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
7	72	32	4		14	18	2			2
Всего 72 часа / 2 зачётные единицы, из них: - контактная работа 40 часов										
Компетенции ПК-1										

Ответственный за образовательную программу  
д.ф.-м.н., проф.

С. В. Цыбуля

Новосибирск, 2022

## Содержание

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы. ....	3
2. Место дисциплины в структуре образовательной программы. ....	4
3. Трудоёмкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу. ....	4
4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведённого на них количества академических часов и видов учебных занятий. ....	5
5. Перечень учебной литературы. ....	7
6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся. ....	7
7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины. ....	7
8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине. ....	8
9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине. ....	8
10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине. ....	8

## 1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы.

Дисциплина "**Введение в физическую газодинамику**" представляет собой начальный курс физической гидродинамики, предназначенный для обучения студентов-физиков, специализирующихся в области аэрофизики и газовой динамики, в котором описываются основные понятия и методы решения задач, возникающих при изучении динамики движения вязкого газа.

Курс «Введение в физическую газодинамику» имеет своей целью: дать студентам физикам представление об относительно новом направлении в механике сплошной среды, связанном с гиперзвуковыми течениями, плазменными и химически реагирующими потоками, релаксационными процессами и т. д., когда имеет место возбуждение внутренних степеней свободы, химические превращения, излучение и поглощение лучистой энергии. В настоящее время эти разделы физики и механики образуют научный фундамент многих важных технических и технологических задач. Основной целью освоения дисциплины является ознакомление с общими методами и подходами в исследованиях по данному направлению, включая получение новых практических результатов. Овладение данным курсом позволит студентам лучше ориентироваться в соответствующей научной и технической литературе, в практической деятельности даст возможность на уровне оценок и приближенных вычислений выделить основные аспекты решаемой проблемы, грамотно ставить и решать задачи, как в теоретическом, так и в экспериментальном плане.

Дисциплина нацелена на формирование у выпускника следующей профессиональной компетенции:

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
<p><b>ПК-1</b> Способность использовать специализированные знания в области физики при построении теоретических моделей физических явлений и процессов в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования</p>	<p><b>ПК 1.1</b> Применяет специализированные знания в области физики при воспроизведении учебного материала с требуемой степенью научной точности и полноты.</p> <p><b>ПК 1.2</b> Использует специализированные знания при проведении научных изысканий в избранной области.</p> <p><b>ПК 1.3</b> Выбирает наиболее эффективные методы построения теоретических моделей физических явлений и процессов в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования</p>	<p><b>Знать</b> основы динамики разреженных газов, физики ионизованного газа и магнитной гидродинамики, современные методы и подходы в исследовании протекающих там процессов, теоретические основы и базовые представления научного исследования в области газовой динамики.</p> <p><b>Уметь</b> решать типичные задачи на основе воспроизведения стандартных алгоритмов решения; объяснять причинно-следственные связи физических процессов, уметь использовать полученные теоретические знания при решении практических задач.</p> <p><b>Владеть</b> основными современными методами расчета объекта научного исследования по спектроскопии и при определении реакционной способности молекул.</p>

## 2. Место дисциплины в структуре образовательной программы.

Дисциплина "Введение в физическую газодинамику" реализуется в осеннем семестре 4-го курса бакалавриата, обучающихся по направлению подготовки 03.03.02 Физика. Курс является одной из профессиональных дисциплин по выбору, реализуемых кафедрой аэрофизики и газовой динамики. Для его восприятия требуется предварительная подготовка студентов по таким физическим дисциплинам как электродинамика, а также по математике (дифференциальное и интегральное исчисления, ряды Фурье, численные методы решения систем линейных уравнений, элементы теории групп и др.) и спецкурсов кафедры: «Теоретическая аэрогидромеханика 1», «Теоретическая аэрогидромеханика 2». Освоение дисциплины "Введение в физическую газодинамику" необходимо при подготовке и выполнении выпускной квалификационной работы.

## 3. Трудоемкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу.

Семестр	Общий объем	Виды учебных занятий (в часах)				Промежуточная аттестация (в часах)				
		Контактная работа обучающихся с преподавателем			Самостоятельная работа, не включая период сессии	Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем			
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия			Консультации	Зачет	Дифференцированный зачет	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
7	72	32	4		14	18	2			2
Всего 72 часа / 2 зачётные единицы, из них: - контактная работа 40 часов										
Компетенции ПК-1										

Реализация дисциплины предусматривает практическую подготовку при проведении следующих видов занятий, предусматривающих участие обучающихся в выполнении отдельных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью: лекции, практические занятия, консультации, самостоятельная работа студента и её контроль преподавателями с помощью заданий, экзамен.

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля:

- текущий контроль успеваемости: задания для самостоятельного решения;
- промежуточная аттестация: экзамен.

Общая трудоемкость рабочей программы дисциплины составляет 2 зачетные единицы.

- занятия лекционного типа – 32 часа;
  - практические занятия – 4 часа;
  - самостоятельная работа обучающегося в течение семестра, не включая период сессии – 14 часов;
  - промежуточная аттестация (подготовка к сдаче экзамена, консультации и экзамен) – 22 часа.
- Объём контактной работы обучающегося с преподавателем (занятия лекционного типа, практические занятия, групповые консультации, экзамен) составляет 40 часов.

**4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведённого на них количества академических часов и видов учебных занятий.**

Дисциплина «Введение в физическую газодинамику» представляет собой полугодовой курс, читаемый на 4-м курсе физического факультета НГУ в 7 семестре. Общая трудоемкость дисциплины составляет 2 зачётные единицы, 72 академических часа.

№ п/п	Раздел дисциплины	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)				Промежуточная аттестация (в часах)
			Всего	Аудиторные часы		Сам. работа во время занятий (не включая период сессии)	
				Лекции	Практические занятия		
1	2	3	4	5	6	7	10
1.	Уравнения механики сплошной среды	1	4	2		2	
2	Ударные волны	2	4	2		2	
3	Волны горения и детонационные волны в газе	3	4	2		2	
4	Теория переноса в газах.	4-6	8	6		2	
5.	Равновесный состав химически реагирующего газа и плазмы	7-8	6	4		2	
6.	Кинетика физико-химических и ионизационных процессов, релаксация	9-11	10	6	2	2	
7	Основы теории переноса излучения	12-14	8	6			
8	Радиационные процессы	15-17	8	4	2	2	
9.	Самостоятельная работа в период подготовки к промежуточной аттестации		18				18
10.	Консультации перед экзаменом		2				2
11.	Экзамен		2				2
<b>Всего</b>			<b>72</b>	<b>32</b>	<b>4</b>	<b>14</b>	<b>2</b>

**Программа и основное содержание лекций (30 часов)**

**Раздел 1. Уравнения механики сплошной среды (2 часа)**

Предмет изучения. Общая система уравнений механики сплошной среды. Замыкающие уравнения. Обобщение исходной системы на случай учета переноса излучения и электромагнитного поля. Основные понятия термодинамики: первый, второй и третий законы термодинамики; уравнение состояния; основные термодинамические функции.

**Раздел 2. Ударные волны (2 часа)**

Ударные волны, предельные случаи сильной и слабой ударной волны. Изменение энтропии в ударной волне. Оценка толщины ударного перехода. Постановка задачи о структуре ударной волны. Элементарная теория ударной трубы

**Раздел 3. Волны горения и детонационные волны в газе (2 часа)**

Распространение фронта горения в газе. Ударные волны в реагирующем газе, детонация. Точка Чепмена – Жуге, оценка скорости детонационной волны.

#### **Раздел 4. Теория переноса в газах (6 часов)**

Потенциалы взаимодействия. Столкновение частиц. Сечение рассеяния. Эффективное сечение столкновений. Элементарная теория столкновений: средняя частота столкновений, средняя длина свободного пробега, длина свободного пробега для смеси частиц различного сорта. Элементарная кинетическая теория переноса: теплопроводность, вязкое трение, диффузия. Диффузия в смеси двух газов. Амбиполярная диффузия в плазме. Теплопроводность ионизованного газа при наличии диффузионных потоков массы. Статистические методы в теории переноса. Уравнение Больцмана, - приближение, коэффициенты взаимности Онзагера.

#### **Раздел 5. Равновесный состав химически реагирующего газа и плазмы (4 часа)**

Обобщение основных термодинамических тождеств на случай системы с переменным числом частиц. Условие равновесия, закон действующих масс. Универсальное уравнение равновесия для систем со слабым взаимодействием. Диссоциация двухатомных молекул. Ионизация атомов. Уравнение Саха. Снижение потенциала ионизации. Равновесный состав газа при наличии химических реакций. Основные термодинамические соотношения для однократно ионизованного газа

#### **Раздел 6. Кинетика физико-химических и ионизационных процессов, релаксация (6 часов)**

Общие термины и понятия. Химические реакции и методы расчета констант скоростей реакций: теория столкновений, метод активированного комплекса. Релаксационные процессы в газах. Вращательная релаксация. Колебательная релаксация. Уравнение кинетики диссоциации двухатомных молекул и время релаксации. Скорости рекомбинации атомов и диссоциации двухатомных молекул. Скорости реакции при химических превращениях. Кинетика ионизационных процессов: ионизация и рекомбинация, электронное возбуждение (общее представление). Ионизация возбужденных атомов электронным ударом. Ионизация атомов ударами тяжелых частиц. Фотоионизация и фоторекомбинация. Возбуждение атомов из основного состояния электронным ударом, дезактивация. Ионизация невозбужденных атомов электронным ударом.

#### **Раздел 7. Основы теории переноса излучения (6 часов)**

Методы описания излучения. Равновесное излучение и абсолютно черное тело. Уравнения радиационной газодинамики, приближение лучистого теплообмена. Уравнение переноса излучения. Процессы испускания, поглощения и рассеяния света в газах. Закон Кирхгофа. Интегрирование уравнения переноса излучения. Квазистационарность поля излучения. Модель плоского слоя. Эффективная и яркостная температура поверхности. Предельные приближения: приближение Планка; приближение Росселанда; разбиение спектра по оптической плотности, степени черноты плоского слоя и полусферического объема; приближение «серой материи»; многогрупповое приближение.

#### **Раздел 8. Радиационные процессы (4 часа)**

Радиационные процессы: свободно-свободные, связанно-свободные и связанно-связанные электронные переходы. Лучеиспускающая способность и коэффициент поглощения в непрерывном и дискретном спектрах излучения. Полосатые спектры молекул. Правила отбора для электронных переходов. Структура молекулярных спектров. Расчет спектрального коэффициента поглощения. Прикладные вопросы переноса излучения.

#### **Программа практических занятий (4 часа)**

*Занятие 1.* Кинетика физико-химических и ионизационных процессов, релаксация. (2 часа)

*Занятие 2.* Радиационные процессы (2 часа)

## Самостоятельная работа студентов (32 часа)

Перечень занятий на СРС	Объем, час
Подготовка к практическим занятиям.	6
Изучение теоретического материала, не освещаемого на лекциях	8
Подготовка к экзамену	18

### 5. Перечень учебной литературы.

#### 5.1. Основная литература

##### а) Рекомендованная литература к теоретическому курсу:

1. Румер Ю.Б., Рывкин М.Ш. Термодинамика, статистическая физика и кинетика. // М.: Наука, 1977
2. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. // М.: Наука, 1966.
3. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. М.: Изд-тво АН СССР, 1962. Т. II
4. Базаров И.П. Термодинамика. // М.: Высш. шк., 1991.

#### 5.2. Дополнительная литература

1. М.Н. Коган Динамика разреженного газа. // М.: Наука, 1967.
2. Б.Н. Четверушкин. Математическое моделирование задач динамики излучающего газа. // М.: Наука, 1985.

### 6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся.

Самостоятельная работа студентов поддерживается следующими учебными пособиями:

1. Кацнельсон С.С. «Введение в физическую газодинамику» Новосибирск: НГУ.-2006. -127 С.- 9,4 печ. листа. -ISBN 5-94356-363-6. <http://ns.itam.nsc.ru/lib/ecatalog/>
2. А.И. Бурштейн, Р.И. Солоухин. Физика молекулярных и сплошных сред. // Новосибирск, НГУ, 1972 <http://ns.itam.nsc.ru/lib/ecatalog/>
3. Блох А.Г. Основы теплообмена излучением. // М.-Л.: Госэнергоиздат. 1962. <http://ns.itam.nsc.ru/lib/ecatalog/>
4. Радиационный теплоперенос в высокотемпературных газах: Справочник/ Головнев И.Ф., Замураев В.П., Кацнельсон С.С. и др.; Под редакцией Р.И. Солоухина. // М.: Энергоатомиздат, 1984. <http://ns.itam.nsc.ru/lib/ecatalog/>
5. С.С. Кацнельсон, Г.А. Ковальская Теплофизические и оптические свойства аргоновой плазмы. Новосибирск: Наука. Сиб. Отделение. 1985 <http://ns.itam.nsc.ru/lib/ecatalog/>
6. Г. Грим. Спектроскопия плазмы. // М.: Атомиздат, 1969. <http://ns.itam.nsc.ru/lib/ecatalog/>
7. Г. Грим. Уширение спектральных линий в плазме. М.: Мир, 1978. <http://ns.itam.nsc.ru/lib/ecatalog/>

### 7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.

Для освоения дисциплины используются следующие ресурсы:

- электронная информационно-образовательная среда НГУ (ЭИОС);
- образовательные интернет-порталы;
- информационно-телекоммуникационная сеть Интернет.

### **7.1 Современные профессиональные базы данных**

Не используется

### **7.2. Информационные справочные системы**

Не используются.

## **8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.**

Для обеспечения реализации дисциплины используется стандартный комплект программного обеспечения (ПО), включающий регулярно обновляемое лицензионное ПО Windows и MS Office.

Использование специализированного программного обеспечения для изучения дисциплины не требуется.

## **9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине.**

Для реализации дисциплины «Введение в физическую газодинамику» используются специальные помещения:

Учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа, практических занятий, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля, промежуточной и итоговой аттестации.

Учебные аудитории укомплектованы специализированной мебелью и техническими средствами обучения, служащими для представления учебной информации большой аудитории.

Реализация дисциплины может осуществляться с применением электронного обучения (на платформе Zoom) где обучение проводится на виртуальных аналогах, позволяющим достигать запланированных результатов по дисциплине.

Материально-техническое обеспечение образовательного процесса по дисциплине для обучающихся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья осуществляется согласно «Порядку организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам для инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья в Новосибирском государственном университете».

## **10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.**

### **10.1 Порядок проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине**

#### ***Текущий контроль***

Текущий контроль осуществляется в ходе семестра путем опроса в начале каждой лекции по материалам предыдущей лекции, а также путем опросов на усвоение материала текущей лекции



и решения типовых задач по теме текущей лекции. Студентам необходимо решить задачи, содержащиеся в двух заданиях, относящихся к разделам лекций 1-6 и 7-8.

### **Промежуточная аттестация**

Освоение компетенций оценивается согласно шкале оценки уровня сформированности компетенции. Положительная оценка по дисциплине выставляется в том случае, если заявленная компетенция ПК-1 сформирована не ниже порогового уровня в части, относящейся к формированию способности использовать специализированные знания, полученные при изучении курса «Введение в физическую газодинамику» в профессиональной деятельности.

Окончательная оценка работы студента в течение семестра происходит на экзамене. Экзамен проводится в конце семестра в экзаменационную сессию по билетам. Вопросы и задачи билета подбираются таким образом, чтобы проверить уровень сформированности компетенции ПК-1.

Вывод об уровне сформированности компетенций принимается преподавателем. Каждый вопрос билета оценивается от 0 до 5 баллов. Положительная оценка ставится, когда все компетенции освоены не ниже порогового уровня. Оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» означают успешное прохождение промежуточной аттестации.

### **Соответствие индикаторов и результатов освоения дисциплины**

**Таблица 10.1**

<b>Индикатор</b>	<b>Результат обучения по дисциплине</b>	<b>Оценочные средства</b>
<b>ПК 1.1</b> Применяет специализированные знания в области физики при воспроизведении учебного материала с требуемой степенью научной точности и полноты.	<b>Знать</b> основы динамики разреженных газов, физики ионизованного газа и магнитной гидродинамики, современные методы и подходы в исследовании протекающих там процессов, теоретические основы и базовые представления научного исследования в области газовой динамики.	Проведение опроса, экзамен.
<b>ПК 1.2</b> Использует специализированные знания при проведении научных изысканий в избранной области	<b>Уметь</b> решать типичные задачи на основе воспроизведения стандартных алгоритмов решения; объяснять причинно-следственные связи физических процессов, уметь использовать полученные теоретические знания при решении практических задач.	Проведение опроса, экзамен.
<b>ПК 1.3</b> Выбирает наиболее эффективные методы построения теоретических моделей физических явлений и процессов в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования	<b>Владеть</b> основными современными методами расчета объекта научного исследования по спектроскопии и при определении реакционной способности молекул.	Проведение опроса, экзамен.

## 10.2 Описание критериев и шкал оценивания индикаторов достижения результатов обучения по дисциплине «Введение в физическую газодинамику».

Таблица 10.2

Критерии оценивания результатов обучения	Планируемые результаты обучения (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)	Уровень освоения компетенции			
		Не сформирован (0 баллов)	Пороговый уровень (3 балла)	Базовый уровень (4 балла)	Продвинутый уровень (5 баллов)
1	2	3	4	5	6
Полнота знаний	ПК1.1	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имеют место грубые ошибки.	Демонстрирует общие знания базовых понятий по темам/разделам дисциплины. Допускается значительное количество негрубых ошибок.	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Допускается несколько негрубых/несущественных ошибок. Не отвечает на дополнительные вопросы.	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Свободно и аргументированно отвечает на дополнительные вопросы.
Наличие умений	ПК1.2	Отсутствие минимальных умений. Не умеет решать стандартные задачи. Имеют место грубые ошибки.	Продемонстрированы частично основные умения. Решены типовые задачи. Допущены негрубые ошибки.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задания с негрубыми ошибками или с недочетами.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задания в полном объеме без недочетов и ошибок.
Наличие навыков (владение опытом)	ПК1.3	Отсутствие владения материалом по темам/разделам дисциплины. Нет навыков в решении стандартных задач. Наличие грубых ошибок.	Имеется минимальный набор навыков при решении стандартных задач с некоторыми недочетами.	Имеется базовый набор навыков при решении стандартных задач с некоторыми недочетами.	Имеется базовый набор навыков при решении стандартных задач без ошибок и недочетов. Продемонстрированы знания по решению нестандартных задач.

## 10.3 Типовые контрольные задания и материалы, необходимые для оценки результатов обучения

### Задание 1 для самостоятельного решения

1. Каковы должны быть параметры газа высокого давления (гелий) в ударной трубе, чтобы получить  $M=10$  ударной волны в газе (70% ксенона, 30% криптона). Рассмотреть возможные варианты.
2. Определить скорость распространения волны горения с учетом температурной зависимости коэффициента теплопроводности.
3. Найти скорость газа за фронтом сильной детонационной волны если известен тепловой эффект химической реакции.
4. Оценить сечение столкновения молекул в газе с потенциалом взаимодействия Леннарда-Джонса (6-12).

5. На основе уравнения Больцмана в «τ-приближении» определить коэффициент теплопроводности в газе, при наличии малого градиента температуры. Время релаксации  $\tau \approx 1/\nu$ . Для нахождения частоты столкновений  $\nu$  использовать эффективное сечение для потенциала  $U = -\alpha/r^6$  (модель Сюзерленда) [1].

6. Рассчитать коэффициенты взаимной диффузии и термодиффузии в водороде при  $T = 2000\text{K}$  и  $p = 10^5\text{Па}$ . Использовать литературные данные по потенциалу диссоциации и газокинетическим сечениям.

7. Определить коэффициент бародиффузии в изотермической смеси двух газов.

8. Рассчитать равновесный состав метана в реакции  $\text{CH}_4 = \text{C} + 4\text{H}$  для  $T = 2000\text{K}$ ,  $p = 10^5\text{Па}$ . Константа диссоциации  $K_D(T) = P_C P_H^4 / P_{\text{CH}_4}$  задана полиномом :

$$\lg K_D(x) = k_0 + k \ln x + k_{-2}x^{-2} + k_{-1}x^{-1} + k_1x + k_2x^2 + k_3x^3 + k_4x^4 + k_5x^5 + k_6x^6 + k_7x^7$$

$$(x = T \cdot 10^{-4}; 293,15 \leq T \leq 6000\text{K})$$

$k_0$	$k$	$k_{-2} \cdot 10^4$	$k_{-1}$	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$	$k_5$	$k_6$	$k_7$
38,4581	5,7413	-2,231	-8,5207	-32,69	54,451	-70,08	48,147	5,300	-33,52	16,64

Здесь  $K_D [\text{am}^4]$  ( $1 \text{ am} = 9,8 \cdot 10^4 \text{ н / м}^2$ )

9. Во сколько раз изменится давление в водородной плазме при увеличении температуры от  $10^4$  до  $1,5 \cdot 10^4 \text{K}$ . Давление в газе при  $T = 300 \text{K}$  равнялось  $10^5 \text{Па}$

10. Рассчитать коэффициенты скоростей ионизации ( $\kappa_f^e$ ), рекомбинации ( $\kappa_r^e$ ) и времени релаксации ( $\tau_e$ ) в аргоне при  $T = 15000\text{K}$  и  $p = 10^5\text{Па}$ .

### Задание 2 для самостоятельного решения

1. Найти яркостную температуру плоского изотермического слоя в приближении «серой материи». Заданы: толщина слоя  $d$ , температура  $T$ , коэффициент поглощения  $\kappa(T)$ .
2. Медная пластина толщиной 2 мм и массой 100 г. нагрета до температуры 1000 С и помещена в вакуумированную емкость. Степень черноты поверхности пластины  $\varepsilon = 0,1$ , оценить время, за которое пластина остынет до  $T=500 \text{C}$ , до комнатной температуры?
3. Найти лучеиспускательную способность фоторекомбинационного излучения в газе в приближении водородоподобности атомов и захвата электрона на основной уровень.
4. Определить лучеиспускательную способность тормозного излучения и средний планковский коэффициент поглощения при  $T = 2 \cdot 10^4 \text{K}$ ,  $p = 10^5 \text{Па}$ .
5. Определить температуру, при котором резонансное уширение линии аргона  $\nu_0 = 2,86 \cdot 10^{15} \text{с}^{-1}$  станет равное доплеровскому уширению при давлении  $10^5 \text{Па}$ .
6. Определить коэффициент излучения (лучеиспускательную способность) линии аргона  $\nu_0 = 2,86 \cdot 10^{15} \text{с}^{-1}$  для  $T = 1,5 \cdot 10^4 \text{K}$ ,  $p = 10^5 \text{Па}$ . Значение штарковской полуширины взять из [9, 10].
7. Вычислить сечение поглощения при связанно-связанных переходах и среднюю длину свободного пробега фотона в центре линии при переходах в водороде с уровня  $n=1$  на уровень  $n=2$  (линия Лайма). Сила осциллятора этого перехода  $f_{12}=0,146$ .

Примечание: Все численные расчеты должны быть представлены с приведением расчетных схем

### Вопросы к экзамену

1. Система уравнений механики сплошной среды. Учет излучения.
2. Релаксационные процессы в газах: вращательная релаксация.
3. Ударные волны в газовой динамике.

4. Релаксационные процессы в газах: колебательная релаксация.
5. Изменение энтропии в ударной волне. Оценка толщины ударного перехода.
6. Кинетика ионизационных процессов: ионизация невозбужденных атомов электронным ударом.
7. Элементарная теория ударной трубы.
8. Кинетика ионизационных процессов: ионизация невозбужденных атомов ударом тяжелых частиц.
9. Распространение фронта горения в газе, способном к химической реакции.
10. Кинетика ионизационных процессов: фотоионизация и фоторекомбинация.
11. Ударные волны в реагирующем газе. Детонация.
12. Основные понятия теории переноса излучения. Равновесное излучение и абсолютно черное тело. Учет излучения в уравнениях РГД.
13. Частота столкновений и средняя длина свободного пробега.
14. Замыкающее уравнение системы уравнений РГД (вывод).
15. Элементарная кинетическая теория переноса. Коэффициенты диффузии, вязкого течения, проводимости.
16. Излучение плоского слоя.
17. Столкновение частиц. Сечение рассеяния. Эффективное сечение столкновений.
18. Предельные приближения в теории переноса излучения: однородные модели, приближение Планка.
19. Потенциалы взаимодействия. Оценка эффективных сечений столкновений.
20. Предельные приближения в теории переноса излучения: диффузионное приближение, приближение Росселанда.
21. Уточнение моделей переноса: диффузия в смеси двух газов.
22. Предельные приближения в теории переноса излучения: разбиение спектра по оптической плотности. Степени черноты.
23. Уточнение моделей переноса: теплопроводность.
24. Приближение «серой материи». Многогрупповое приближение для расчета переноса излучения.
25. Расчет транспортных коэффициентов на основе уравнения Больцмана в “ $\tau$  – приближении”. Коэффициенты взаимности Онзагера.
26. Лучеиспускательная способность и коэффициент поглощения тормозного излучения.
27. Термодинамика и равновесный состав химически реагирующего газа.
28. Фоторекомбинация и фотоионизация.
29. Диссоциация двухатомных молекул. Равновесный состав газа при наличии химических реакций.
30. Спектральный коэффициент поглощения плазмы в непрерывном спектре.
31. Расчет состава низкотемпературной плазмы. Снижение потенциала ионизации.
32. Интегральный коэффициент поглощения в непрерывном спектре.
33. Химические реакции и методы расчета скорости реакции: теория столкновений.
34. Связанно-связанные переходы, спектральный коэффициент поглощения в линии.
35. Химические реакции и методы расчета скорости реакции: теория переходного состояния.
36. Полосатые спектры молекул.

### **Примерные варианты экзаменационных задач**

1. Каковы должны быть параметры газа высокого давления (гелий) в ударной трубе, чтобы получить  $M=10$  ударной волны в газе (70% ксенона, 30% криптона). Рассмотреть возможные варианты.
2. Определить скорость распространения волны горения с учетом температурной зависимости коэффициента теплопроводности.

3. Найти скорость газа за фронтом сильной детонационной волны если известен тепловой эффект химической реакции.
4. Оценить сечение столкновения молекул в газе с потенциалом взаимодействия Леннарда-Джонса (6-12).
5. На основе уравнения Больцмана в «τ-приближении» определить коэффициент теплопроводности в газе, при наличии малого градиента температуры. Время релаксации  $\tau \approx 1/\nu$ . Для нахождения частоты столкновений  $\nu$  использовать эффективное сечение для потенциала  $U = -\alpha/r^6$  (модель Сюзерленда) [1].
6. Рассчитать коэффициенты взаимной диффузии и термодиффузии в водороде при  $T = 2000\text{K}$  и  $p = 10^5\text{Па}$ . Использовать литературные данные по потенциалу диссоциации и газокинетическим сечениям.
7. Определить коэффициент бародиффузии в изотермической смеси двух газов.
8. Рассчитать равновесный состав метана в реакции  $\text{CH}_4 = \text{C} + 4\text{H}$  для  $T = 2000\text{K}$ ,  $p = 10^5\text{Па}$ . Константа диссоциации  $K_D(T) = P_C P_H^4 / P_{\text{CH}_4}$  задана полиномом :  

$$\lg K_D(x) = k_0 + k \ln x + k_{-2}x^{-2} + k_{-1}x^{-1} + k_1x + k_2x^2 + k_3x^3 + k_4x^4 + k_5x^5 + k_6x^6 + k_7x^7$$
 $(x = T \cdot 10^{-4}; 293,15 \leq T \leq 6000\text{K})$

$k_0$	$k$	$k_{-2} \cdot 10^4$	$k_{-1}$	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$	$k_5$	$k_6$	$k_7$
38,4581	5,7413	-2,231	-8,5207	-32,69	54,451	-70,08	48,147	5,300	-33,52	16,64

Здесь  $K_D [am^4]$  ( $1 am = 9,8 \cdot 10^4 \text{ н} / \text{м}^2$ )

9. Во сколько раз изменится давление в водородной плазме при увеличении температуры от  $10^4$  до  $1,5 \cdot 10^4\text{K}$ . Давление в газе при  $T = 300\text{K}$  равнялось  $10^5\text{Па}$
10. Рассчитать коэффициенты скоростей ионизации ( $\kappa_i^e$ ), рекомбинации ( $\kappa_r^e$ ) и времени релаксации ( $\tau_e$ ) в аргоне при  $T = 15000\text{K}$  и  $p = 10^5\text{Па}$ .
8. Найти яркостную температуру плоского изотермического слоя в приближении «серой материи». Заданы: толщина слоя  $d$ , температура  $T$ , коэффициент поглощения  $\kappa(T)$ .
9. Медная пластина толщиной 2 мм и массой 100 г. нагрета до температуры 1000 С и помещена в вакуумированную емкость. Степень черноты поверхности пластины  $\varepsilon = 0,1$ , оценить время, за которое пластина остынет до  $T = 500\text{C}$ , до комнатной температуры?
10. Найти лучеиспускательную способность фоторекомбинационного излучения в газе в приближении водородоподобности атомов и захвата электрона на основной уровень.
11. Определить лучеиспускательную способность тормозного излучения и средний планковский коэффициент поглощения при  $T = 2 \cdot 10^4\text{K}$ ,  $p = 10^5\text{Па}$ .
12. Определить температуру, при котором резонансное уширение линии аргона  $\nu_0 = 2,86 \cdot 10^{15}\text{с}^{-1}$  станет равное доплеровскому уширению при давлении  $10^5\text{Па}$ .
13. Определить коэффициент излучения (лучеиспускательную способность) линии аргона  $\nu_0 = 2,86 \cdot 10^{15}\text{с}^{-1}$  для  $T = 1,5 \cdot 10^4\text{K}$ ,  $p = 10^5\text{Па}$ . Значение штарковской полуширины взять из [9, 10].
14. Вычислить сечение поглощения при связанно-связанных переходах и среднюю длину свободного пробега фотона в центре линии при переходах в водороде с уровня  $n = 1$  на уровень  $n = 2$  (линия Лайма). Сила осциллятора этого перехода  $f_{12} = 0,146$ .

### Пример экзаменационного билета

1. Расчет состава низкотемпературной плазмы. Снижение потенциала ионизации. (ПК-1)
2. Интегральный коэффициент поглощения в непрерывном спектре. (ПК-1)

3. Вычислить сечение поглощения при связанно-связанных переходах и среднюю длину свободного пробега фотона в центре линии при переходах в водороде с уровня с  $n=1$  на уровень с  $n=2$  (линия Лайма). Сила осциллятора этого перехода  $f_{12}=0.146$ . (ПК-2)

Форма экзаменационного билета представлена на рисунке

<p><b>МИНОБРНАУКИ РОССИИ</b></p> <p><b>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования</b> <b>«Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»</b> <b>(Новосибирский государственный университет, НГУ)</b></p> <p><b>Физический факультет</b></p>
<p><b>ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № _____</b></p> <p>1. .... 2. .... 3. ....</p> <p>Составитель _____ /Поздняков Г.А./ (подпись)</p> <p>« ____ » _____ 20 ____ г.</p>

Оценочные материалы по промежуточной аттестации, предназначенные для проверки соответствия уровня подготовки по дисциплине требованиям СУОС, хранятся на кафедре-разработчике РПД в печатном и электронном виде.

**Лист актуализации рабочей программы  
по дисциплине «Введение в физическую газодинамику»  
по направлению подготовки 03.03.02 Физика  
Профиль «Общая и фундаментальная физика»**

№	Характеристика внесенных изменений (с указанием пунктов документа)	Дата и № протокола Учёного совета ФФ НГУ	Подпись ответственного