

**Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)»**

**УТВЕРЖДЕНО**

**Директор физтех-школы  
аэрокосмических технологий  
С.С. Негодяев**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Физическая механика
<b>по направлению:</b>	Техническая физика
<b>профиль подготовки:</b>	Техническая физика космических летательных аппаратов Физтех-школа Аэрокосмических Технологий центр образовательных программ ФАКТ
<b>курс:</b>	4
<b>квалификация:</b>	бакалавр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

7 (осенний) - Зачет

8 (весенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 120 всего, в том числе:

лекции: 60 час.

семинары: 60 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 75 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 225, всего зач. ед.: 5

Количество контрольных работ, заданий: 4

Программу составил: В.П. Коновалов, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник

Программа обсуждена на заседании центра образовательных программ ФАКТ 02.12.2024

## Аннотация

Курс «Физическая механика» включает в себя разделы, которые относятся к базовой части учебной программы, изучается на 4 курсе бакалавриата.

Изучение учебной дисциплины направлено на формирование базовых знаний по гидрогазодинамике для использования в областях и дисциплинах естественнонаучного профиля, при решении прикладных задач ракетно-космической техники, формирование исследовательских навыков.

В ходе изучения курса студенты получают базовые знания и навыки по вопросам гидрогазодинамики ракетно-космической техники.

### 1. Цели и задачи

#### Цель дисциплины

- получение студентами фундаментальных знаний о принципах описания высокотемпературной сплошной среды, т.е. многокомпонентного электропроводящего флюида как единого физического объекта. Сюда включены теплофизические свойства газов и плазмы, термодинамические свойства идеальных и неидеальных газов и плазмы, элементарные процессы в газах и плазме, химические реакции, в том числе диссоциация и ионизация, оптические свойства газов, перенос радиационного излучения; гидродинамика высокотемпературных газов и плазмы в присутствии электромагнитных полей, турбулентные явления.

#### Задачи дисциплины

- подробное изучение студентами разделов курса (термодинамические свойства газов и плазмы, кинетические свойства высокотемпературных сред, гидродинамическое описание высокотемпературных сред, турбулентное движение);
- понимание студентами фундаментальных принципов, корректный анализ отдельных физических явлений в высокотемпературной сплошной среде для их необходимого совокупного исследования;
- самостоятельное выполнение студентами заданий по физической механике, включающих аналитическое решение конкретных задач и их компьютерное моделирование.

### 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-3 Способен осуществлять теоретические и экспериментальные исследования в избранной области технической физики, учитывать современные тенденции развития технической физики в своей профессиональной деятельности	ОПК-3.1 Способен проводить анализ проблем и задач, возникающих в избранной области технической физики
	ОПК-3.2 Способен решать поставленные задачи в области теоретических и экспериментальных исследований
	ОПК-3.3 Обладает способностью к освоению и применению новых знаний, полученных при изучении литературы, научных статей и других источников
ОПК-7 Способен самостоятельно осваивать современную физическую, аналитическую и технологическую аппаратуру различного назначения и работать на ней	ОПК-7.1 Понимает принципы работы используемой физической, аналитической и технологической аппаратуры
	ОПК-7.2 Владеет навыками безопасной работы с современной физической, аналитической и технологической аппаратурой
	ОПК-7.3 Проводит эксперимент с использованием физической, аналитической и технологической аппаратуры

### 3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны знать:

- термодинамические свойства газов и плазмы;
- кинетические свойства высокотемпературной среды;
- гидродинамическое описание высокотемпературной среды во внешних электромагнитных полях.

уметь:

- теоретически описывать высокотемпературную сплошную среду в совокупности сложных физических процессов;
- оценивать относительную важность различных физических явлений;
- разумно использовать возможные аналитические приближения;
- давать качественное объяснение сложных физических эффектов.

владеть:

- аналитическими и численными методами совместного решения уравнений термодинамики, гидродинамики и электродинамики для описания физических процессов в высокотемпературной сплошной среде.

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

##### 4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Термодинамические свойства газов и плазмы	10	10		10
2	Кинетические свойства высокотемпературных сред	14	14		10
3	Оптические свойства высокотемпературных сред	6	6		10
4	Феноменологическое описание многокомпонентной сплошной среды	8	10		10
5	Радиационные процессы в гидродинамике высокотемпературных сред	6	6		10
6	Гидродинамические приближения для высокотемпературной сплошной среды	8	6		10
7	Турбулентное движение высокотемпературных сред	8	8		15
Итого часов		60	60		75
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		225 час., 5 зач.ед.			

##### 4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

Семестр: 7 (Осенний)

###### 1. Термодинамические свойства газов и плазмы

Термодинамические потенциалы.

Статистическая сумма и термодинамические функции идеального газа с внутренними степенями свободы.

Неидеальные газы. Вириальное разложение.  
Дебаевская теория слабонеидеальной плазмы.  
Химическое равновесие реагирующего газа.  
Диссоциация идеального двухатомного газа.  
Влияние химических реакций на термодинамические функции, теплоемкость, уравнение состояния.  
Ионизационное равновесие в плазме. Формула Саха.  
Влияние неидеальности на ионизационное равновесие.  
Система термодинамических уравнений, определяющая состав многокомпонентного многоэлементного газа.

## 2. Кинетические свойства высокотемпературных сред

Определение и методы расчета сечений взаимодействия частиц.  
Классическое рассеяние частиц в центральном потенциале.  
Рассеяние на малые углы. Формула Резерфорда.  
Условия применимости классической механики для рассеяния частиц.  
Квантовые эффекты в рассеянии электронов - эффект Рамзауэра, резонансное рассеяние электронов на молекулах.  
Кинетическое уравнение Больцмана.  
Релаксационное приближение для интеграла столкновений.  
Интеграл столкновений в форме Бхатнагара-Гросса-Крука.  
Метод Чепмена-Энскога решения кинетического уравнения Больцмана.  
Явления переноса в газе и плазме: диффузия, теплопроводность, вязкость, электропроводность.  
Коэффициенты переноса в смесях газов.  
Влияние химических реакций на коэффициенты переноса.  
Униполярная и амбиполярная диффузии.  
Диэлектрическая проницаемость плазмы. Поглощение электромагнитных волн в газе.  
Релаксационные процессы в газе. Оценки времен  $T_T$ ,  $T_R$ ,  $T_V$ ,  $T_VV$  - релаксаций.  
Теория Ландау-Теллера для  $T_V$  релаксации.

## 3. Оптические свойства высокотемпературных сред

Тормозное излучение и поглощение света при рассеянии электронов на атомах и ионах.  
Фотоионизация и фоторекомбинация.  
Излучение спектральных линий в газе.  
Механизмы уширения спектральных линий: естественный, доплеровский, штарковский.

Семестр: 8 (Весенний)

## 4. Феноменологическое описание многокомпонентной сплошной среды

Система уравнений гидродинамического описания движения высокотемпературных сред.  
Общее уравнение переноса для произвольной величины. Уравнение непрерывности.  
Уравнения диффузии при наличии химических реакций многокомпонентной, многоэлементной среды, предельные случаи уравнения диффузии для замороженного и локально- химически равновесного течений.  
Уравнение движения многокомпонентной сплошной среды при наличии гравитационных и электромагнитных полей.  
Уравнения Максвелла для электромагнитного поля, уравнение сохранения электрического заряда.  
Уравнения баланса кинетической, электромагнитной, гравитационной, полной и внутренней энергии.  
Уравнения для энтальпии, полной энтальпии и температуры многокомпонентной среды при наличии химических реакций, электромагнитных полей и излучения.

Производство энтропии. Скалярная, векторная и тензорная части производства энтропии.  
Общие выражения для термодинамических потоков. Обобщенное выражение для кинетических коэффициентов. Соотношения Онсагера. Положительность кинетических коэффициентов.  
Тензор вязких напряжений Стокса. Первая и вторая вязкости.

#### 5. Радиационные процессы в гидродинамике высокотемпературных сред

Уравнение переноса излучения, его общее решение, феноменологический и кинетический выводы.  
Общее решение уравнения переноса излучения. Излучение плоского слоя.  
Учет излучения в уравнении баланса энергии.  
Излучение оптически тонкого и оптически толстого неоднородно нагретых тел.  
Приближение Планка и приближение лучистой теплопроводности.

#### 6. Гидродинамические приближения для высокотемпературной сплошной среды

Уравнения тепло- и массопереноса для локально-химически равновесной среды. Выражения для потоков тепла, заряда, массы в частных случаях: однокомпонентного частично-ионизованного газа, двухкомпонентного частично-диссоциированного газа, двухэлементной среды с химическими реакциями.  
Многожидкостная гидродинамика, обобщенный закон Ома.  
Неравновесная плазма с различными температурами электронов и газа.  
Неравновесный газ с различными колебательной и газовой температурами.  
Магнитогидродинамическое приближение. Уравнение магнитной индукции.  
Тензор максвелловских напряжений в электромагнитном поле. Интеграл Бернулли в магнитной гидродинамике.  
Магнитогидродинамические течения в каналах. Слой Гартмана.  
Кинематика и динамика идеально-проводящей жидкости.  
Плохо проводящая среда, безиндукционное приближение, скин-слой.  
Приближение пограничного слоя.  
Критерии подобия в гидродинамике и магнитной гидродинамике.

#### 7. Турбулентное движение высокотемпературных сред

Постановка задач в теории турбулентности. Статистическое описание турбулентных течений. Перемешиваемость. Уравнения Фридриха-Келлера. Проблема замыкания системы уравнений.  
Однородная изотропная турбулентность. Теория Колмогорова-Обухова однородной и изотропной турбулентности.  
Корреляционные функции. Масштабы турбулентности – локальный, интегральный, масштабы в анизотропных турбулентных потоках. Спектральные формы корреляционных функций.  
Уравнение Кармана-Ховарта. Координатная и спектральная формы. Решение уравнения на стадии распада турбулентности. Инвариант Лойцянского.  
Полуэмпирические модели для неоднородных турбулентных течений.  
Уравнения Рейнольдса. Тензор напряжений Рейнольдса в турбулентном потоке.  
Теория Прандтля-Кармана. Логарифмическое распределение скоростей в слое с постоянным напряжением трения. Аппроксимация поперечного масштаба турбулентности.  
Баланс турбулентной кинетической энергии несжимаемой жидкости. Распределение статей баланса турбулентного движения в пограничном слое и в круглой трубе.  
Полуэмпирические двухпараметрические K- $\epsilon$  модели турбулентности, K- $\epsilon$  модель.

### 5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

учебная аудитория, оснащенная компьютером и мультимедийным оборудованием (проектор, звуковая система).

## 6. Перечень рекомендуемой литературы

### Основная литература

1. Физическая механика [Текст] : лаб. практикум по газовой динамике, гидродинамике и физической механике : учеб. пособие для вузов / под ред. Э. Е. Соны ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Моск. физ.-техн. ин-т (гос. ун-т), Фак. аэрофизики и космических исслед., Каф. физической механики. — М. : Изд-во ИФТИ, 2006. — 383 с.
2. Теоретическая физика [Текст] : в 10 т. Т. 5, Ч. 1 : Статистическая физика : учеб. пособие для ун-тов / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц ; под ред. Л. П. Питаевского. — 5-е изд., стереотип. — М. : Физматлит, 2001, 2002, 2005, 2010. — 616 с.
3. Теоретическая физика [Текст] : в 10 т. Т. 8 : Электродинамика сплошных сред : учеб. пособие для ун-тов / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. — М. : Наука, 1992, 2001, 2003, 2005. — 662 с.
4. Теоретическая физика [Текст] : в 10 т. Т. 10 : Физическая кинетика : учеб. пособие для вузов / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц ; под ред. Л. П. Питаевского. — 2-е изд., испр. — М. : Физматлит, 2001, 2002, 2007. — 536 с.
5. Теоретическая физика [Текст] : в 10 т. Т. 6 : Гидродинамика : учеб. пособие для вузов : рек. М-вом образования Рос. Федерации / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц ; под ред. Л. П. Питаевского. — 5-е изд., стереотип. — 3-е изд., перераб. — М. : Физматлит, 1986, 1988, 2003, 2006. — 736 с.

### Дополнительная литература

1. Общий курс физики [Текст] : в 5 т. Т. 3 : Электричество : учеб. пособие для вузов / Д. В. Сивухин. — 4-е изд., стереотип. — М. : Физматлит, 2002-2006, 2009. — 656 с.
2. Радиационные процессы в плазме [Текст] : [учеб. пособие для вузов] / Дж. Бекефи ; пер. с англ. М. Д. Райзера ; под ред. А. А. Веденова. — М. : Мир, 1971. — 437 с.
3. Физика газового разряда [Текст] : [учеб. пособие для вузов] / Ю. П. Райзер. — 3-е изд., перераб. и доп. — Долгопрудный : Интеллект, 2009. — 736 с.

## 7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)

<http://lib.mipt.ru> - Электронная библиотека Физтеха  
<http://benran.ru> - Библиотека по естественным наукам Российской академии наук  
<http://www.britannica.com/topic-browse/Physics> - Encyclopaedia Britannica, Physics  
<https://www-amdis.iaea.org> - International Atomic Energy Agency, Atomic and Molecular Data

## 8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)

язык математического программирования: Fortran, C++, Maple, MathLab, Origin.

## 9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)

В результате изучения дисциплины студент должен знать основные определения, понятия, аксиомы.

Успешное освоение курса требует напряжённой самостоятельной работы студента. В программе курса приведено минимально необходимое время для работы студента над темой. Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение и конспектирование рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала (по учебной и научной литературе), подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения, доказательство отдельных утверждений, свойств;
- подготовку к зачету и экзамену.

Руководство и контроль за самостоятельной работой студента осуществляется в форме индивидуальных консультаций.

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями к лектору.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

<b>по направлению:</b>	Техническая физика
<b>профиль подготовки:</b>	Техническая физика космических летательных аппаратов Физтех-школа Аэрокосмических Технологий центр образовательных программ ФАКТ
<b>курс:</b>	<u>4</u>
<b>квалификация:</b>	бакалавр
Семестры, формы промежуточной аттестации:	
	7 (осенний) - Зачет
	8 (весенний) - Экзамен
<b>Разработчик:</b>	В.П. Коновалов, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник



## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-3 Способен осуществлять теоретические и экспериментальные исследования в избранной области технической физики, учитывать современные тенденции развития технической физики в своей профессиональной деятельности	ОПК-3.1 Способен проводить анализ проблем и задач, возникающих в избранной области технической физики
	ОПК-3.2 Способен решать поставленные задачи в области теоретических и экспериментальных исследований
	ОПК-3.3 Обладает способностью к освоению и применению новых знаний, полученных при изучении литературы, научных статей и других источников
ОПК-7 Способен самостоятельно осваивать современную физическую, аналитическую и технологическую аппаратуру различного назначения и работать на ней	ОПК-7.1 Понимает принципы работы используемой физической, аналитической и технологической аппаратуры
	ОПК-7.2 Владеет навыками безопасной работы с современной физической, аналитической и технологической аппаратурой
	ОПК-7.3 Проводит эксперимент с использованием физической, аналитической и технологической аппаратуры

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Физическая механика» обучающийся должен:

### знать:

- термодинамические свойства газов и плазмы;
- кинетические свойства высокотемпературной среды;
- гидродинамическое описание высокотемпературной среды во внешних электромагнитных полях.

### уметь:

- теоретически описывать высокотемпературную сплошную среду в совокупности сложных физических процессов;
- оценивать относительную важность различных физических явлений;
- разумно использовать возможные аналитические приближения;
- давать качественное объяснение сложных физических эффектов.

### владеть:

- аналитическими и численными методами совместного решения уравнений термодинамики, гидродинамики и электродинамики для описания физических процессов в высокотемпературной сплошной среде.

## 3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю

### **3. Перечень типовых контрольных заданий, используемых для оценки знаний, умений, навыков**

Промежуточная аттестация по дисциплине «Физическая механика» осуществляется в форме зачета в 7 семестре и в форме экзамена в 8 семестре. Зачет проводится по итогам текущей посещаемости занятий и сдачи заданий; его заслуживает студент, регулярно посещавший лекции и семинары и сдавший в первом полугодии по крайней мере одно задание.

Текущий контроль проводится в период аудиторной и самостоятельной работы студентов в установленные сроки согласно расписанию.

- оценка ответов на вопросы в процессе краткого (до 5 мин) выборочного устного опроса перед началом каждого практического занятия по материалам предыдущего занятия;
- оценка умения решать типовые примеры и/или задачи, рассматриваемые на практических занятиях;
- оценка активности и ответов на вопросы в соответствии с программой практических занятий.

Обучающийся должен проявить всестороннее, систематическое и глубокое знание учебно-программного материала, умение свободно выполнять задания, предусмотренные программой, усвоить основную литературу и быть знакомым с дополнительной литературой, рекомендованной программой дисциплины, усвоить взаимосвязь основных понятий дисциплины, решать предложенные преподавателем задачи.

#### **Примеры задач из заданий (по одной из каждого задания):**

##### Задача 1.20.

Получить формулу диссоциативного равновесия двухатомных молекул. Построить график зависимости степени диссоциации азота от температуры при постоянном давлении  $p = 1$  атм.

##### Задача 2.18.

В магнито-гидродинамических генераторах используется смесь инертного газа с парами щелочных металлов. Определить оптимальную концентрацию калия в смеси с аргоном при  $T = 2300\text{K}$ ,  $p = 1$  атм, обеспечивающую наибольшую электропроводность.

##### Задача 3.16.

Найти степень возрастания магнитного поля при сжатии идеально проводящей жидкости вдоль поля, поперёк поля, а также при цилиндрическом и сферическом сжатиях.

##### Задача 4.18.

Получить закон "5/3" Колмогорова-Обухова для спектральной плотности турбулентной энергии. Изобразить результат графически.

Итоговый экзамен в конце учебного года проводится в устной форме. Условием допуска студента к экзамену является успешная сдача им всех четырех заданий.

#### **Примеры вопросов к экзамену:**

1. Кинетическое уравнение Больцмана.
2. Уравнение переноса излучения. Излучение плоского слоя.

3. Диэлектрическая проницаемость плазмы. Поглощение электромагнитных волн в газе.
4. Механизмы уширения спектральных линий: естественный, доплеровский, штарковский.
5. Интеграл Бернулли в магнитной гидродинамике.
6. Система уравнений гидродинамического описания движения высокотемпературных сред.
7. Амбиполярная и униполярная диффузии.
8. Равновесная диссоциация идеального двухатомного газа.
9. Уравнения Максвелла для электромагнитного поля, уравнение сохранения электрического заряда.
10. Кинематика и динамика идеально-проводящей жидкости.
11. Теплоемкость двухатомного газа, температурная зависимость.
12. Критерии подобия в гидродинамике и магнитной гидродинамике.
13. Теория Колмогорова-Обухова однородной изотропной турбулентности.
14. Уравнения Рейнольдса. Тензор напряжений Рейнольдса в турбулентном потоке.

### **Примеры экзаменационных билетов на экзамене:**

#### Экзаменационный билет 8

1. Амбиполярная и униполярная диффузии.
2. Теория Колмогорова-Обухова однородной изотропной турбулентности.

#### Экзаменационный билет 18

1. Равновесная диссоциация идеального двухатомного газа.
2. Интеграл Бернулли в магнитной гидродинамике.

#### Экзаменационный билет 26

1. Уравнение переноса излучения. Излучение плоского слоя.
2. Теплоемкость двухатомного газа, температурная зависимость.

### **4. Критерии оценивания**

Оценка «зачтено» выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка «не зачтено» выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных понятий дисциплины и не умеет использовать полученные знания при решении типовых практических задач.

Оценка «отлично (10, 9)» выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

оценка «хорошо (8,7,6)» выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

оценка «удовлетворительно (5,4,3)» выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

оценка «неудовлетворительно (2,1)» выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных понятий дисциплины и не умеет использовать полученные знания при решении типовых практических задач.

## **5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности**

Порядок проведения зачёта:

Зачет в 7 семестре служит формой проверки уровня усвоения студентами базовых положений по материалам лекций и семинарских занятий 7 семестра и проставляется по результатам текущего контроля, выполнения заданий и посещаемости занятий студентами.

Для студентов, которые посетили в 7 семестре не менее 75% занятий на последнем занятии проводится устный опрос по материалам.

Порядок проведения экзамена:

При проведении устного экзамена обучающемуся предоставляется не менее 60 минут на подготовку. При подготовке к ответу на экзамене студенту разрешается пользоваться любой литературой, причем, в первую очередь, рекомендуются его собственные конспекты.

Во время ответа на экзаменационные вопросы (по билету и дополнительные) никакую литературу использовать нельзя. Опрос студента по билету на устном экзамене не должен превышать двух астрономических часов.