

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

**УТВЕРЖДЕНО**

**Директор физтех-школы  
электроники, фотоники и  
молекулярной физики**

**В.В. Иванов**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Физико-химические процессы в газодинамике
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Физика перспективных технологий: альтернативная энергетика, научное программирование и функциональные материалы Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра физики высокотемпературных процессов
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 0 час.

семинары: 30 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 75 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Программу составил: В.В. Шумова, канд. физ.-мат. наук, доцент

Программа обсуждена на заседании кафедры физики высокотемпературных процессов 12.02.2024

## Аннотация

Курс "Физико-химические процессы в газодинамике" предусматривает изучение теоретических основ и ознакомление с экспериментальными методами исследования физико-химических процессов, происходящих в ударных волнах и в сверхзвуковых расширяющихся потоках высокоэнтальпийного газа.

### Задачи курса:

ознакомление с особенностями газодинамических процессов, с участием релаксирующих газовых смесей, с замедленным возбуждением внутренних степеней свободы атомов и молекул, с иерархией характерных времен релаксационных процессов, с механизмами влияния релаксационных процессов на газодинамические параметры;

ознакомление с существующими теоретическими и эмпирическими моделями расчета характерных времен релаксационных процессов в газах;

формирование способности оперировать полученными знаниями для оценок характерных времен релаксационных процессов в задачах газодинамики, выбора приближений и моделей для постановки и проведения исследования газодинамических процессов.

Основное содержание курса изложено в следующих разделах:

1. Анггармонические колебания молекул, релаксация многоатомных молекул
2. Вращательная релаксация
3. Газодинамика с переносом излучения
4. Диссоциация и рекомбинация
5. Диффузионное приближение и лучистая теплопроводность
6. Ионизация и рекомбинация в газах
7. Колебательная релаксация
8. Перенос излучения
9. Поступательная релаксация
10. Релаксационные процессы
11. Ударные волны докритической и сверхкритической амплитуд
12. Химические реакции в зоне ударной волны

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

- изучение теоретических основ и ознакомление с экспериментальными методами исследования физико-химических процессов, происходящих в ударных волнах и в сверхзвуковых расширяющихся потоках высокоэнтальпийного газа.

### Задачи дисциплины

- ознакомление с особенностями газодинамических процессов, с участием релаксирующих газовых смесей, с замедленным возбуждением внутренних степеней свободы атомов и молекул, с иерархией характерных времен релаксационных процессов, с механизмами влияния релаксационных процессов на газодинамические параметры;
- ознакомление с существующими теоретическими и эмпирическими моделями расчета характерных времен релаксационных процессов в газах;
- формирование способности оперировать полученными знаниями для оценок характерных времен релаксационных процессов в задачах газодинамики, выбора приближений и моделей для постановки и проведения исследования газодинамических процессов.

## 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности

<p>решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты</p>	<p>ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели</p>
	<p>ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты</p>

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

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- фундаментальные понятия, законы, теории классической и современной физики;
- порядки численных величин, характерные для различных разделов физики;
- современные проблемы физики, химии, математики;
- основы молекулярной физики, химической кинетики и термодинамики, физики плазмы, ударных волн;
- экспериментальные методы исследования релаксационных свойств газов и газовых смесей;
- теоретические подходы к расчету характерных времен релаксационных процессов в газовых смесях;
- современные модели описания релаксационных процессов в газах и подходы к описанию газодинамических процессов.

уметь:

- абстрагироваться от несущественного при моделировании реальных физических ситуаций;
- пользоваться своими знаниями для решения фундаментальных, прикладных 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;
- работать на современном, в том числе и уникальном экспериментальном оборудовании;
- эффективно использовать информационные технологии и компьютерную технику для достижения необходимых теоретических и экспериментальных результатов.

владеть:

- навыками освоения большого объема информации;
- навыками самостоятельной работы в лаборатории;
- культурой постановки и моделирования физических задач;
- навыками грамотной обработки результатов экспериментов и сопоставления с теоретическими и литературными данными;
- практикой исследования и решения теоретических и прикладных задач;
- навыками выполнения оценок характерных времен релаксационных процессов в газодинамических процессах с участием высокоэнтальпийных газов.

### 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	Ангармонические колебания молекул, релаксация многоатомных молекул		3		5
2	Вращательная релаксация		3		5

3	Газодинамика с переносом излучения		3		5
4	Диссоциация и рекомбинация		2		5
5	Диффузионное приближение и лучистая теплопроводность		3		5
6	Ионизация и рекомбинация в газах		2		5
7	Колебательная релаксация		3		5
8	Перенос излучения		3		5
9	Поступательная релаксация		2		5
10	Релаксационные процессы		2		10
11	Ударные волны докритической и сверхкритической амплитуд		2		10
12	Химические реакции в зоне ударной волны		2		10
Итого часов			30		75
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		135 час., 3 зач.ед.			

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

##### Семестр: 2 (Весенний)

##### 1. Анггармонические колебания молекул, релаксация многоатомных молекул

Модель анггармонического осциллятора. Распределение Тринора. Релаксация в однокомпонентной системе анггармонических осцилляторов. Колебательная релаксация многоатомных молекул.

##### 2. Вращательная релаксация

Вращательная релаксация. Особенности и характерное время вращательной релаксации. Классическая и полуклассические теории вращательной релаксации. Адиабатические и неадиабатические вращательные уровни. Экспериментальные методы определения времен вращательной релаксации.

##### 3. Газодинамика с переносом излучения

Уравнения газодинамики с учетом энергии давления излучения и лучистого теплообмена. Формулировка задачи о структуре фронта сильной ударной волны. Опережающее излучение и температура прогрева.

##### 4. Диссоциация и рекомбинация

Диссоциация в условиях многомодовой колебательной неравновесности. Кинетика рекомбинации в сверхзвуковых расширяющихся потоках высокоэнтальпийного диссоциированного газа.

##### 5. Диффузионное приближение и лучистая теплопроводность

Движение вещества с учетом лучистого теплообмена. Диффузионное приближение. Локальное равновесие излучения и приближение лучистой теплопроводности. Росселандов пробег излучения. Взаимоотношение диффузионного приближения и приближения лучистой теплопроводности. Потери энергии нагретого вещества на излучение.

##### 6. Ионизация и рекомбинация в газах

Ионизационная зона сильных ударных волн в газах. Механизмы появления первичных электронов: модель Ландау-Зинера, фотоионизация. Основные механизмы ионизации в ударных волнах. Температура электронов и тяжелых частиц. Кинетика ступенчатой ионизации. Кинетика рекомбинации в сверхзвуковых расширяющихся потоках частично ионизованного газа.

## 7. Колебательная релаксация

Колебательная релаксация. Модель гармонического осциллятора. Формула Ландау-Теллера. Колебательная релаксация малой примеси двухатомного газа в среде инертного газа. Распределение молекул по колебательным уровням при V-T-обмене. Колебательная релаксация в однокомпонентной системе двухатомных молекул, моделируемых гармоническими осцилляторами. V-V-обмен.

## 8. Перенос излучения

Основные понятия. Спектральная интенсивность и плотность излучения. Длины пробега излучения в среде. Механизмы испускания, поглощения и рассеяния света в газах. Уравнение переноса излучения. Закон Кирхгофа. Излучение плоского слоя.

## 9. Поступательная релаксация

Поступательная релаксация. Газокинетическое уравнение Больцмана. Характерные времена поступательной релаксации в однокомпонентной и двухкомпонентной системах одноатомных газов. Немаксвелловские распределения. Эффекты, вызываемые поступательной неравновесностью во фронте ударной волны.

## 10. Релаксационные процессы

Понятие о релаксационной зоне ударной волны в реальном газе. Особенности газодинамики релаксирующих газов с замедленным возбуждением внутренних степеней свободы молекул. Иерархия характерных времен релаксационных процессов.

## 11. Ударные волны докритической и сверхкритической амплитуд

Ударная волна докритической амплитуды. Ближняя и дальняя прекурсорные зоны. Ближняя прекурсорная зона в атомарных газах. Диффузия резонансного излучения в дальней прекурсорной зоне. Ударная волна сверхкритической амплитуды.

## 12. Химические реакции в зоне ударной волны

Химические реакции в релаксационной зоне ударных волн. Особенности взаимодействия колебательной релаксации и диссоциации многоатомных молекул. Статистическая теория мономолекулярного распада. Двухтемпературные модели диссоциации. Лестничные модели.

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

Необходимое оборудование для практических занятий: учебная аудитория, компьютеры и мультимедийное оборудование (проектор), доступ к сети Интернет.

# 6. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

Литература выдается на кафедре:

1. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П.. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Физматлит. Изд. 3., 656 с., 2008.
2. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Интеллект, 2009.

Дополнительная литература

Литература выдается на кафедре:

1. Гордиец Б.Ф., Осипов А.И., Шелепин Л.А. Кинетические процессы в газах и молекулярные лазеры. М.: Наука, 1980.
2. Биберман Л.М., Воробьев В.С., Якубов И.Т. Кинетика неравновесной низкотемпературной плазмы. М: Наука, 1982.

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

1. Курс лекций «Физика плазмы», <http://www.inp.nsk.su/chairs/plasma/sk/fpl.ru.shtml>

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

не предусмотрены.

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

Студент, изучающий дисциплину, должен с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике. В результате изучения дисциплины студент должен знать основные определения дисциплины, уметь применять полученные знания для решения различных задач.

Успешное освоение курса требует:

- посещения всех занятий, предусмотренных учебным планом по дисциплине;
- ведения конспекта занятий;
- напряжённой самостоятельной работы студента.

Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала, подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения;
- решение задач, предлагаемых студентам на занятиях;
- подготовку к выполнению заданий текущей и промежуточной аттестации.

Показателем владения материалом служит умение без конспекта отвечать на вопросы по темам дисциплины.

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

Возможен промежуточный контроль знаний студентов в виде решения задач в соответствии с тематикой занятий.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Физика перспективных технологий: альтернативная энергетика, научное программирование и функциональные материалы Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра физики высокотемпературных процессов
<b>курс:</b>	<u>1</u>
<b>квалификация:</b>	магистр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Экзамен	
<b>Разработчик:</b>	В.В. Шумова, канд. физ.-мат. наук, доцент

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Физико-химические процессы в газодинамике» обучающийся должен:

### знать:

- фундаментальные понятия, законы, теории классической и современной физики;
- порядки численных величин, характерные для различных разделов физики;
- современные проблемы физики, химии, математики;
- основы молекулярной физики, химической кинетики и термодинамики, физики плазмы, ударных волн;
- экспериментальные методы исследования релаксационных свойств газов и газовых смесей;
- теоретические подходы к расчету характерных времен релаксационных процессов в газовых смесях;
- современные модели описания релаксационных процессов в газах и подходы к описанию газодинамических процессов.

### уметь:

- абстрагироваться от несущественного при моделировании реальных физических ситуаций;
- пользоваться своими знаниями для решения фундаментальных, прикладных 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;
- работать на современном, в том числе и уникальном экспериментальном оборудовании;
- эффективно использовать информационные технологии и компьютерную технику для достижения необходимых теоретических и экспериментальных результатов.

### владеть:

- навыками освоения большого объема информации;
- навыками самостоятельной работы в лаборатории;
- культурой постановки и моделирования физических задач;
- навыками грамотной обработки результатов экспериментов и сопоставления с теоретическими и литературными данными;
- практикой исследования и решения теоретических и прикладных задач;
- навыками выполнения оценок характерных времен релаксационных процессов в газодинамических процессах с участием высокоэнтальпийных газов.

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

С целью контроля освоения обучающимися учебного материала проводится устный опрос в начале занятия.



#### 4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся

Вопросы к экзамену:

1. Прямой скачок уплотнения.
2. Фронт ударной волны.
3. Релаксационная зона ударной волны в реальном газе.
4. Релаксационная зона ударной волны, распространяющейся в горючей смеси.
5. Возбуждение внутренних степеней свободы молекул.
6. Иерархия характерных времен релаксационных процессов в смесях молекулярных и атомарных газов.
7. Приближение замороженной релаксации.
8. Приближение равновесного возбуждения внутренних степеней свободы.
9. Релаксационное уравнение.
10. Поступательная релаксация в однокомпонентной и двухкомпонентной системах одноатомных газов.
11. Кинетическое уравнение Больцмана.
12. Приближение сильных столкновений.
13. Эффекты, вызываемые поступательной неравновесностью во фронте ударной волны.
14. Вращательная релаксация. Приближение жесткого ротатора.
15. Параметр Мессе. Адиабатический и неадиабатический механизм релаксации.
16. Экспериментальные методы определения времен вращательной релаксации.
17. Колебательная релаксация. Модель гармонического осциллятора (ГО). Распределение Больцмана по уровням ГО.
18. Формула Ландау-Теллера.
19. V-T-обмен.
20. V-V-обмен.
21. Теория SSH.
22. Модель ангармонического осциллятора (АГО). Распределение Тринора.
23. Колебательная релаксация многоатомных молекул. Модовое приближение.
24. Принцип действия газодинамического лазера на углекислом газе.
25. Диссоциация при неравновесном колебательном возбуждении.
26. Двух и многотемпературные модели диссоциации.
27. Релаксационная зона ударной волны в реальном газе.
28. Диссоциация при высоких температурах.
29. Кинетика рекомбинации в сверхзвуковых расширяющихся потоках высокоэнтальпийного диссоциированного газа.
30. Основные механизмы ионизации в ударных волнах.
31. Рекомбинация в сверхзвуковых расширяющихся потоках частично ионизованного газа.
32. Газодинамические параметры потоков газов с замороженными и релаксирующими внутренними степенями свободы.
33. Роль переноса излучения в формировании и распространении сильных ионизирующих ударных волн.
34. Распределение параметров в прекурсорной зоне сильной ударной волны.

Примеры экзаменационных билетов.

Пример 1.

1. Вращательная релаксация. Приближение жесткого ротатора
2. Роль переноса излучения в формировании и распространении сильных ионизирующих ударных волн.

Пример 2.

1. Релаксационная зона ударной волны в реальном газе.
2. Эффекты, вызываемые поступательной неравновесностью во фронте ударной волны.

#### Критерии оценивания

Оценка отлично 10 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 9 баллов - 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 отлично 8 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.

Оценка хорошо 7 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка хорошо 6 баллов - 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 хорошо 5 баллов - выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка удовлетворительно 4 бала - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка удовлетворительно 3 бала - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка неудовлетворительно 2 бала - выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка неудовлетворительно 1 бал - выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

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

При проведении устного экзамена обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Опрос обучающегося по билету на устном экзамене не должен превышать одного астрономического часа.