

**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

	Рабочая программа дисциплины (модуля)
по дисциплине:	Физика ударных волн
по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Физика перспективных технологий: альтернативная энергетика, научное программирование и функциональные материалы Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра физической и химической механики
курс:	4
квалификация:	бакалавр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 7 (осенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 30 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

Программу составил: С.Т. Суржиков, д-р физ.-мат. наук, профессор

Программа обсуждена на заседании кафедры физической и химической механики 29.05.2020

Аннотация

Курс "Физика ударных волн" предусматривает изучение основ физики ударных волн: структуры фронта ударной волны, структуры релаксационной зоны за фронтом ударной волны, основных неравновесных процессов, протекающих в релаксационной зоне.

По результатам освоения курса студент должен:

Задачи курса:

- освоение студентами базовых знаний в области физики ударных волн и неравновесных процессов;
- приобретение теоретических знаний в области физики ударных волн и неравновесных процессов;
- изучение подходов, используемых для анализа и расчета параметров различных неравновесных систем;
- оказание консультаций и помощи студентам в проведении собственных теоретических и экспериментальных исследований в области физики ударных волн и неравновесных процессов.

Знать:

фундаментальные понятия, связанные с теорией физики ударных волн и неравновесных процессов;
современные проблемы физики ударных волн и неравновесных процессов;
основные (базовые) методы и подходы для анализа различных неравновесных систем;
математический аппарат теории физики ударных волн и неравновесных процессов;
основные экспериментальные методы для проведения исследований в области физики ударных волн и неравновесных процессов.

Уметь:

оценивать основные параметры ударных волн: ширину фронта ударной волны, газодинамические параметры газа за фронтом ударной волны;
производить численные оценки по порядку величины;
делать качественные выводы при переходе к предельным условиям в изучаемой физической проблеме;
получать наилучшие значения измеряемых величин и правильно оценить степень их достоверности.

Владеть:

навыками освоения большого объема информации;
культурой постановки и численного моделирования физических задач с наличием ударных волн и учетом протекающих в системе неравновесных процессов;
навыками грамотной обработки результатов численного моделирования и сопоставления с теоретическими данными в части моделирования ударных волн и неравновесных процессов.

Основное содержание курса изложено в следующих разделах:

1. Элементарная теория ударных волн.
2. Структура фронта ударной волны с учетом вязкости и теплопроводности.
3. Структура релаксационной зоны за фронтом ударной волны.
4. Колебательная релаксация за фронтом ударной волны.
5. Кинетика термической диссоциации.
6. Ионизация и рекомбинация. Электронное возбуждение и дезактивация.
7. Свободные электроны в релаксационной зоне за фронтом ударной волны.
8. Лучистый теплообмен во фронте ударной волны.
9. Экспериментальные методы исследования неравновесных явлений в ударных волнах.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

- изучение основ физики ударных волн: структуры фронта ударной волны, структуры релаксационной зоны за фронтом ударной волны, основных неравновесных процессов, протекающих в релаксационной зоне.

Задачи дисциплины

- освоение студентами базовых знаний в области физики ударных волн и неравновесных процессов;
- приобретение теоретических знаний в области физики ударных волн и неравновесных процессов;
- изучение подходов, используемых для анализа и расчета параметров различных неравновесных систем;
- оказание консультаций и помощи студентам в проведении собственных теоретических и экспериментальных исследований в области физики ударных волн и неравновесных процессов.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач	УК-1.1 Анализирует задачу, выделяя этапы ее решения, действия по решению задачи
	УК-1.3 Рассматривает различные варианты решения задачи, оценивает их преимущества и недостатки
ПК-1 Способен планировать и проводить научные эксперименты (в избранной предметной области) и (или) теоретические (аналитические и имитационные) исследования	ПК-1.1 Владеет фундаментальными понятиями, законами и теориями современной физики
	ПК-1.4 Умеет строить математические модели для описания и исследования процессов и явлений в соответствующих научных областях
ПК-4 Способен критически оценивать применимость используемых методик и методов	ПК-4.3 Способен обосновать причинно-следственные отношения используемых понятий и моделей

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

фундаментальные понятия, связанные с теорией физики ударных волн и неравновесных процессов;
 современные проблемы физики ударных волн и неравновесных процессов;
 основные (базовые) методы и подходы для анализа различных неравновесных систем;
 математический аппарат теории физики ударных волн и неравновесных процессов;
 основные экспериментальные методы для проведения исследований в области физики ударных волн и неравновесных процессов.

уметь:

оценивать основные параметры ударных волн: ширину фронта ударной волны, газодинамические параметры газа за фронтом ударной волны;
 производить численные оценки по порядку величины;
 делать качественные выводы при переходе к предельным условиям в изучаемой физической проблеме;
 получать наилучшие значения измеряемых величин и правильно оценить степень их достоверности.

владеть:

навыками освоения большого объема информации;
 культурой постановки и численного моделирования физических задач с наличием ударных волн и учетом протекающих в системе неравновесных процессов;
 навыками грамотной обработки результатов численного моделирования и сопоставления с теоретическими данными в части моделирования ударных волн и неравновесных процессов.

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	Элементарная теория ударных волн.	2			2
2	Структура фронта ударной волны с учетом вязкости и теплопроводности.	4			2
3	Структура релаксационной зоны за фронтом ударной волны.	4			2
4	Колебательная релаксация за фронтом ударной волны.	4			2
5	Кинетика термической диссоциации.	4			6
6	Ионизация и рекомбинация. Электронное возбуждение и дезактивация.	4			10
7	Свободные электроны в релаксационной зоне за фронтом ударной волны.	4			2
8	Лучистый теплообмен во фронте ударной волны.	2			2
9	Экспериментальные методы исследования неравновесных явлений в ударных волнах.	2			2
Итого часов		30			30
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		90 час., 2 зач.ед.			

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

Семестр: 7 (Осенний)

1. Элементарная теория ударных волн.

Законы сохранения при протекании газа через фронт ударной волны. Соотношения Ренкина-Гюгонио. Адиабата Гюгонио. Законы сохранения на фронте ударной волны с учетом ионизации.

2. Структура фронта ударной волны с учетом вязкости и теплопроводности.

Вязкий скачок уплотнения. Роли вязкости и теплопроводности в образовании скачка уплотнения. Диффузия в бинарной смеси газов. Диффузия в ударной волне, распространяющейся по бинарной смеси.

3. Структура релаксационной зоны за фронтом ударной волны.

Установления максвелловского распределения. Вращательная релаксация. Колебательная релаксация. Кинетика термической диссоциации. Кинетика термической ионизации. Неравновесное излучение ударных волн.

4. Колебательная релаксация за фронтом ударной волны.

Кинетические уравнения и вероятности перехода. Колебательная релаксация двухатомных молекул, составляющих небольшую примесь в одноатомных газах. Колебательная релаксация в чистых газах и в смесях с одноатомным газом. Колебательная релаксация в смеси многоатомных газов.

5. Кинетика термической диссоциации.

Термическая диссоциация как переход молекул из дискретного колебательного состояния в непрерывное. Термическая диссоциация в однокомпонентной системе. Совместное рассмотрение термической диссоциации и колебательной релаксации двухатомных молекул. Модели неравновесной диссоциации.

6. Ионизация и рекомбинация. Электронное возбуждение и дезактивация.

Основные механизмы. Ионизация невозбужденных атомов электронным ударом. Возбуждение атомов из основного состояния электронным ударом. Дезактивация. Ионизация возбужденных атомов электронным ударом. Ударные переходы между возбужденными состояниями атомов. Ионизация и возбуждение ударами тяжелых частиц. Фотоионизация и фоторекомбинация. Электрон-ионная рекомбинация при тройных столкновениях. Ионизация и рекомбинация в воздухе.

7. Свободные электроны в релаксационной зоне за фронтом ударной волны.

Роль свободных электронов в кинетических механизмах за фронтом ударных волн. Механизмы образования свободных электронов в релаксационной зоне. Уравнения для расчета функции распределения электронов за фронтом ударных волн. Уравнения для расчета температуры электронов за фронтом ударных волн.

8. Лучистый теплообмен во фронте ударной волны.

Качественная картина. Приближенная формулировка задачи о структуре фронта. Ударная волна докритической амплитуды. Ударная волна сверхкритической амплитуды. Ударная волна при больших плотности энергии и давлении излучения.

9. Экспериментальные методы исследования неравновесных явлений в ударных волнах.

Ударные трубы. Типы ударных труб. Элементарная теория ударной трубы. Методы измерения плотности газа. Абсорбционные методы измерения концентрации молекул. Оптическое излучение газа. Измерение концентрации электронов.

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. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966.
2. Ступоченко Е.В., Лосев С.А., Осипов А.И. Релаксационные процессы в ударных волнах. М.: Наука, 1965
3. Зельдович Я.Б. Теория ударных волн и введение в газодинамику. Москва-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2002
4. Каплан С.А. Межзвездная газодинамика. М.: ФизМатЛит, 1958

Дополнительная литература

1. Черный Г.Г., Лосев С.А. Физико-химические процессы в газовой динамике. Том 1. М.: Научно-издательский центр механики, 2002.
2. Черный Г.Г., Лосев С.А. Физико-химические процессы в газовой динамике. Том 2. М.: Научно-издательский центр механики, 2002.

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

Не используются

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)

по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Физика перспективных технологий: альтернативная энергетика, научное программирование и функциональные материалы Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра физической и химической механики
курс:	<u>4</u>
квалификация:	бакалавр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 7 (осенний) - Экзамен	
Разработчик:	С.Т. Суржиков, д-р физ.-мат. наук, профессор

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач	УК-1.1 Анализирует задачу, выделяя этапы ее решения, действия по решению задачи
	УК-1.3 Рассматривает различные варианты решения задачи, оценивает их преимущества и недостатки
ПК-1 Способен планировать и проводить научные эксперименты (в избранной предметной области) и (или) теоретические (аналитические и имитационные) исследования	ПК-1.1 Владеет фундаментальными понятиями, законами и теориями современной физики
	ПК-1.4 Умеет строить математические модели для описания и исследования процессов и явлений в соответствующих научных областях
ПК-4 Способен критически оценивать применимость используемых методик и методов	ПК-4.3 Способен обосновать причинно-следственные отношения используемых понятий и моделей

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Физика ударных волн» обучающийся должен:

знать:

фундаментальные понятия, связанные с теорией физики ударных волн и неравновесных процессов;
современные проблемы физики ударных волн и неравновесных процессов;
основные (базовые) методы и подходы для анализа различных неравновесных систем;
математический аппарат теории физики ударных волн и неравновесных процессов;
основные экспериментальные методы для проведения исследований в области физики ударных волн и неравновесных процессов.

уметь:

оценивать основные параметры ударных волн: ширину фронта ударной волны, газодинамические параметры газа за фронтом ударной волны;
производить численные оценки по порядку величины;
делать качественные выводы при переходе к предельным условиям в изучаемой физической проблеме;
получать наилучшие значения измеряемых величин и правильно оценить степень их достоверности.

владеть:

навыками освоения большого объема информации;
культурой постановки и численного моделирования физических задач с наличием ударных волн и учетом протекающих в системе неравновесных процессов;
навыками грамотной обработки результатов численного моделирования и сопоставления с теоретическими данными в части моделирования ударных волн и неравновесных процессов.

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 по теме прошлой лекции или в конце занятия по пройденной теме.

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

Вопросы для подготовки к экзамену:

1. Элементарная теория ударных волн. Законы сохранения при протекании газа через фронт ударной волны.
2. Элементарная теория ударных волн. Соотношения Ренкина-Гюгонио. Адиабата Гюгонио. Законы сохранения на фронте ударной волны с учетом ионизации.

3. Элементарная теория ударных волн. Законы сохранения на фронте ударной волны с учетом ионизации.
4. Структура фронта ударной волны с учетом вязкости и теплопроводности. Вязкий скачок уплотнения.
5. Структура фронта ударной волны с учетом вязкости и теплопроводности. Роли вязкости и теплопроводности в образовании скачка уплотнения.
6. Структура фронта ударной волны с учетом вязкости и теплопроводности. Диффузия в бинарной смеси газов. Диффузия в ударной волне, распространяющейся по бинарной смеси.
7. Структура релаксационной зоны за фронтом ударной волны. Установления максвелловского распределения. Вращательная релаксация.
8. Структура релаксационной зоны за фронтом ударной волны. Колебательная релаксация. Кинетика термической диссоциации.
9. Структура релаксационной зоны за фронтом ударной волны. Кинетика термической ионизации. Неравновесное излучение ударных волн.
10. Колебательная релаксация за фронтом ударной волны. Кинетические уравнения и вероятности перехода.
11. Колебательная релаксация за фронтом ударной волны. Колебательная релаксация двухатомных молекул, составляющих небольшую примесь в одноатомных газах.
12. Колебательная релаксация за фронтом ударной волны. Колебательная релаксация в чистых газах и в смесях с одноатомным газом. Колебательная релаксация в смеси многоатомных газов.
13. Термическая диссоциация как переход молекул из дискретного колебательного состояния в непрерывное.
14. Кинетика термической диссоциации. Термическая диссоциация в однокомпонентной системе.
15. Кинетика термической диссоциации. Совместное рассмотрение термической диссоциации и колебательной релаксации двухатомных молекул. Модели неравновесной диссоциации.
16. Ионизация и рекомбинация. Электронное возбуждение и дезактивация. Основные механизмы. Ионизация невозбужденных атомов электронным ударом. Ионизация возбужденных атомов электронным ударом. Ударные переходы между возбужденными состояниями атомов.
17. Ионизация и рекомбинация. Электронное возбуждение и дезактивация. Возбуждение атомов из основного состояния электронным ударом. Дезактивация.
18. Ионизация и рекомбинация. Электронное возбуждение и дезактивация. Ионизация и возбуждение ударами тяжелых частиц. Фотоионизация и фоторекомбинация.
19. Ионизация и рекомбинация. Электронное возбуждение и дезактивация. Электрон-ионная рекомбинация при тройных столкновениях. Ионизация и рекомбинация в воздухе.
20. Участие свободных электронов неравновесных процессах в релаксационной зоне за фронтом ударной волны. Роль свободных электронов в кинетических механизмах за фронтом ударных волн. Механизмы образования свободных электронов в релаксационной зоне.
21. Участие свободных электронов неравновесных процессах в релаксационной зоне за фронтом ударной волны. Уравнения для расчета функции распределения электронов за фронтом ударных волн.
22. Участие свободных электронов неравновесных процессах в релаксационной зоне за фронтом ударной волны. Уравнения для расчета температуры электронов за фронтом ударных волн.
23. Лучистый теплообмен во фронте ударной волны. Качественная картина. Приближенная формулировка задачи о структуре фронта.
24. Лучистый теплообмен во фронте ударной волны. Ударная волна докритической амплитуды. Ударная волна сверхкритической амплитуды.
25. Лучистый теплообмен во фронте ударной волны. Ударная волна при больших плотности энергии и давлении излучения
26. Экспериментальные методы исследования неравновесных явлений в ударных волнах. Ударные трубы. Типы ударных труб. Элементарная теория ударной трубы.
27. Экспериментальные методы исследования неравновесных явлений в ударных волнах. Методы измерения плотности газа. Абсорбционные методы измерения концентрации молекул. Оптическое излучение газа. Измерение концентрации электронов.

Примеры экзаменационных билетов.

Пример 1.

1. Структура релаксационной зоны за фронтом ударной волны. Установления максвелловского распределения. Вращательная релаксация.
2. Экспериментальные методы исследования неравновесных явлений в ударных волнах. Ударные трубы. Типы ударных труб. Элементарная теория ударной трубы.

Пример 2.

1. Кинетика термической диссоциации. Совместное рассмотрение термической диссоциации и колебательной релаксации двухатомных молекул. Модели неравновесной диссоциации.
2. Ионизация и рекомбинация. Электронное возбуждение и дезактивация. Основные механизмы. Ионизация невозбужденных атомов электронным ударом. Ионизация возбужденных атомов электронным ударом. Ударные переходы между возбужденными состояниями атомов.

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 балла - 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 балла - 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 балла - 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 балл - 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.