

**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>	Молекулярно-кинетическая теория
<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 физической и химической механики
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (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 составили:

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

Д.А. Сторожев, канд. физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры физической и химической механики 29.05.2020

## Аннотация

Курс "Молекулярно-кинетическая теория" предусматривает изучение физических основ механики сплошных сред, основанных на подходах молекулярно-кинетической теории и, в частности, на теории уравнения Больцмана.

Задачи курса:

- освоение студентами базовых знаний в области молекулярно-кинетической теории, составляющей физические основы механики сплошных сред (МСС);
- приобретение теоретических знаний в области физических основ механики сплошных сред;
- изучение способов получения уравнений механики сплошных сред с использованием уравнения Больцмана;
- оказание консультаций и помощи студентам в проведении собственных теоретических и экспериментальных исследований в области МСС;
- освоение студентами базовых знаний для дальнейшего изучения явлений физической механики (газовые разряды, физика ударных волн, релаксационные процессы в физико-химической механике).

Основное содержание курса изложено в следующих разделах:

1. Исторические аспекты создания уравнения Больцмана
2. Микро- и макроскопические величины, характеризующие однородный и неоднородный газ
3. Величины, характеризующие газовые смеси. Дифференциальное сечение, сечение потери импульса
4. Классический вывод уравнения Больцмана
5. Вывод макроскопических законов сохранения
6. Аддитивные инварианты
7. Обобщенный закон сохранения для газовой смеси
8. Вывод уравнений непрерывности, движения и баланса из обобщенного закона
9. H-теорема Больцмана
10. Функция распределения молекул по скоростям в состоянии термодинамического равновесия
11. Метод Чепмена-Энскога
12. Вычисление переносных свойств с использованием полиномов Сонина
13. Особенности кинетической теории частично ионизованных газов и плазмы
14. Столкновительный член Фоккера-Планка
15. Кинетическое уравнение Власова
16. Двучленное (лоренцево) приближение функции распределения. Кинетическое уравнение Больцмана для электронов в плазме тлеющего разряда
17. Численное моделирование кинетического уравнения Больцмана для функции распределения электронов в тлеющем разряде

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

- изучение физических основ механики сплошных сред, основанных на подходах молекулярно-кинетической теории и, в частности, на теории уравнения Больцмана.

### Задачи дисциплины

- освоение студентами базовых знаний в области молекулярно-кинетической теории, составляющей физические основы механики сплошных сред (МСС);
- приобретение теоретических знаний в области физических основ механики сплошных сред;
- изучение способов получения уравнений механики сплошных сред с использованием уравнения Больцмана;
- оказание консультаций и помощи студентам в проведении собственных теоретических и экспериментальных исследований в области МСС;
- освоение студентами базовых знаний для дальнейшего изучения явлений физической механики (газовые разряды, физика ударных волн, релаксационные процессы в физико-химической механике).

## 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

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

## 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;  
методы механики сплошных сред, разработанные на базе молекулярно-кинетической теории.

уметь:

абстрагироваться от несущественного при моделировании реальных физических ситуаций;  
пользоваться своими знаниями для решения фундаментальных и прикладных задач и технологических задач;  
делать правильные выводы из сопоставления результатов теории и эксперимента;  
производить численные оценки по порядку величины;  
делать качественные выводы при переходе к предельным условиям в изучаемых проблемах;  
осваивать новые предметные области, теоретические подходы и методы компьютерной физики;  
получать наилучшие значения измеряемых величин и правильно оценить степень их достоверности;  
работать на современных компьютерах и суперкомпьютерах;  
эффективно использовать информационные технологии и компьютерную технику для достижения необходимых теоретических и прикладных результатов.

владеть:

навыками освоения большого объема информации;  
навыками самостоятельной работы в лаборатории и Интернете;  
культурой постановки и моделирования физических задач;  
навыками грамотной обработки результатов численного моделирования и сопоставления с теоретическими данными;  
практикой исследования и решения теоретических и прикладных задач.

## 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	Исторические аспекты создания уравнения Больцмана	1			2
2	Микро- и макроскопические величины, характеризующие однородный и неоднородный газ	2			2
3	Величины, характеризующие газовые смеси. Дифференциальное сечение, сечение потери импульса	1			2
4	Классический вывод уравнения Больцмана	2			2
5	Вывод макроскопических законов сохранения	4			3
6	Аддитивные инварианты	1			2
7	Обобщенный закон сохранения для газовой смеси	2			2
8	Вывод уравнений непрерывности, движения и баланса из обобщенного закона	2			2
9	H-теорема Больцмана	2			2
10	Функция распределения молекул по скоростям в состоянии термодинамического равновесия	2			2
11	Метод Чепмена-Энскога	2			2
12	Вычисление переносных свойств с использованием полиномов Сонина	1			2
13	Особенности кинетической теории частично ионизованных газов и плазмы	1			1
14	Столкновительный член Фоккера-Планка	1			1
15	Кинетическое уравнение Власова	2			1
16	Двучленное (лоренцево) приближение функции распределения. Кинетическое уравнение Больцмана для электронов в плазме тлеющего разряда.	2			1
17	Численное моделирование кинетического уравнения Больцмана для функции распределения электронов в тлеющем разряде	2			1
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: 1 (Осенний)

##### 1. Исторические аспекты создания уравнения Больцмана

Исторические аспекты создания уравнения Больцмана и роль этого уравнения в развитии теоретической физики XX века. Краткий исторический обзор.

##### 2. Микро- и макроскопические величины, характеризующие однородный и неоднородный газ

Величины, характеризующие однородный и неоднородный газ. Функция распределения и средние значения. Векторы потоков массы, импульса, энергии для однородного и неоднородного газа.

### 3. Величины, характеризующие газовые смеси. Дифференциальное сечение, сечение потери импульса

Величины, характеризующие газовые смеси. Частота столкновений. Средняя длина свободного пробега. Сечения столкновения: полное сечение, дифференциальное сечение, сечение потери импульса. Характеристики величин сечений столкновения. Скорость процесса.

### 4. Классический вывод уравнения Больцмана

Классический вывод уравнения Больцмана. Доказательство теоремы Лиувилля о сохранении фазового объема.

### 5. Вывод макроскопических законов сохранения

Вывод макроскопических законов сохранения для газовой смеси на основе уравнения Больцмана. Обоснование моментной процедуры. Вероятностная трактовка. Гипотеза о молекулярном хаосе.

### 6. Аддитивные инварианты

Введение аддитивных инвариантов. Связь с законами сохранения классической механики.

### 7. Обобщенный закон сохранения для газовой смеси

Получение обобщенного закона сохранения для газовой смеси. Использование теоремы Лиувилля.

### 8. Вывод уравнений непрерывности, движения и баланса из обобщенного закона

Граничные условия в пространстве скоростей. Вывод уравнений непрерывности, движения и баланса энергии из обобщенного закона.

### 9. H-теорема Больцмана

Доказательство H-теоремы Больцмана. Связь со вторым законом термодинамики. Необратимость диссипативных процессов в термодинамических системах.

### 10. Функция распределения молекул по скоростям в состоянии термодинамического равновесия

Применение уравнения Больцмана к анализу термодинамического равновесия в газах. Получение максвелловской функции распределения.

### 11. Метод Чепмена-Энскога

Введение в теорию Чепмена-Энскога. Определение свойств полиномов Сонина.

### 12. Вычисление переносных свойств с использованием полиномов Сонина

Получение расчетных соотношений для свойств переноса газов: вязкости и теплопроводности. Порядок приближения теории Чепмена-Энскога.

### 13. Особенности кинетической теории частично ионизованных газов и плазмы

Дебаевский радиус экранирования. Расчет сечений взаимодействия частиц в плазме.

### 14. Столкновительный член Фоккера-Планка

Получение уравнения Фоккера-Планка. Его основные свойства.

### 15. Кинетическое уравнение Власова

Обоснование кинетического уравнения Власова для бесстолкновительной плазмы. Бесстолкновительные ударные волны.

16. Двучленное (лоренцево) приближение функции распределения. Кинетическое уравнение Больцмана для электронов в плазме тлеющего разряда.

Разложение функции распределения по ортогональным полиномам Лежандра. Лоренцево приближение. Формулировка кинетического уравнения Больцмана для функции распределения в лоренцевом приближении.

17. Численное моделирование кинетического уравнения Больцмана для функции распределения электронов в тлеющем разряде

Методы численного решения кинетического уравнения Больцмана. Конечно разностная аппроксимация уравнения.

## **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. Ферцигер Дж., Капер Г. Математическая теория процессов переноса в газах. -М. Мир, 1976 г., 554 с.
2. Гиршфельдер Дж., Кертисс Ч., Берд Р. Молекулярная теория газов и жидкостей. М. Иностранная литература, 1961 г., 798 с.
3. Митчнер М., Кругер И. Частично ионизированные газы. М. Мир, 1976г., 496 с.
4. Трубников Б.А. Теория плазмы. М. Энергоатомиздат, 1996 г., 464 с.

### Дополнительная литература

1. Смирнов Б.М. Физика слабоионизованного газа. М. Наука, 1972 г., 446 с.

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

<http://www.ipmnet.ru>.

## **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 физической и химической механики
<b>курс:</b>	<u>1</u>
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Экзамен

**Разработчики:**

С.Т. Суржиков, д-р физ.-мат. наук, профессор  
Д.А. Сторожев, канд. физ.-мат. наук



## 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 «Молекулярно-кинетическая теория» обучающийся должен:

### знать:

фундаментальные понятия, законы, теории классической и современной физики;  
порядки численных величин, характерные для различных разделов физики;  
современные проблемы физики, химии, математики;  
методы механики сплошных сред, разработанные на базе молекулярно-кинетической теории.

### уметь:

абстрагироваться от несущественного при моделировании реальных физических ситуаций;  
пользоваться своими знаниями для решения фундаментальных и прикладных задач и технологических задач;  
делать правильные выводы из сопоставления результатов теории и эксперимента;  
производить численные оценки по порядку величины;  
делать качественные выводы при переходе к предельным условиям в изучаемых проблемах;  
осваивать новые предметные области, теоретические подходы и методы компьютерной физики;  
получать наилучшие значения измеряемых величин и правильно оценить степень их достоверности;  
работать на современных компьютерах и суперкомпьютерах;  
эффективно использовать информационные технологии и компьютерную технику для достижения необходимых теоретических и прикладных результатов.

### владеть:

навыками освоения большого объема информации;  
навыками самостоятельной работы в лаборатории и Интернете;  
культурой постановки и моделирования физических задач;  
навыками грамотной обработки результатов численного моделирования и сопоставления с теоретическими данными;  
практикой исследования и решения теоретических и прикладных задач.

## 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 к экзамену:

1. Для чего нужна кинетическая теория в механике сплошных сред.
2. История получения уравнения Больцмана
3. Функция распределения и средние значения.
4. Вектор потока массы.
5. Векторы потока импульса.
6. Вектор потока энергии.
7. Вектор потока массы. Величины, характеризующие газовые смеси.
8. Векторы потока импульса. Величины, характеризующие газовые смеси.
9. Вектор потока энергии. Величины, характеризующие газовые смеси.
10. Потенциалы взаимодействия частиц.
11. Определение понятия частоты столкновений.
12. Средняя длина свободного пробега.
13. Сечения столкновения: полное сечение.
14. Сечения столкновения: дифференциальное сечение.
15. Сечения столкновения: сечение потери импульса.
16. Характеристики величин сечений столкновения. Скорость процесса.
17. Алгоритм классического вывода уравнения Больцмана.
18. Алгоритм вывод макроскопических законов сохранения для газовой смеси на основе уравнения Больцмана. Уравнение закона сохранения энергии.
19. Алгоритм вывод макроскопических законов сохранения для газовой смеси на основе уравнения Больцмана. Уравнение закона сохранения импульса.
20. Алгоритм вывод макроскопических законов сохранения для газовой смеси на основе уравнения Больцмана. Уравнение неразрывности.
21. Аддитивные инварианты.
22. Алгоритм вывода обобщенного закона сохранения для газовой смеси.
23. Алгоритм вывода уравнения непрерывности из обобщенного закона.
24. Алгоритм вывода уравнения движения.
25. Алгоритм вывода уравнения баланса энергии из обобщенного закона.
26. H-теорема Больцмана.
27. Функция распределения молекул по скоростям в состоянии термодинамического равновесия.
28. Метод Чепмена-Энскога в интерпретации Энскога.
29. Приближение нулевого и первого порядка для функции распределения.
30. Вычисление переносных свойств с использованием полиномов Сонина.
31. Вариационный принцип в теории Чепмена-Энскога.
32. Особенности кинетической теории частично ионизованных газов и плазмы.
33. Столкновительный член Фоккера-Планка.
34. Кинетическое уравнение Власова.
35. Переносные свойства частично и сильно ионизованной плазмы.
36. Двучленное(Лоренцево) приближение функции распределения
37. Численная модель решения кинетического уравнения в лоренцевом приближении

Примеры экзаменационных билетов.

Пример 1.

1. Вектор потока массы. Величины, характеризующие газовые смеси.
2. Метод Чепмена-Энскога в интерпретации Энскога.

Пример 2.

1. Характеристики величин сечений столкновения. Скорость процесса.
2. Особенности кинетической теории частично ионизованных газов и плазмы.

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