

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

**УТВЕРЖДЕНО**

**Проректор по учебной работе и  
довузовской подготовке**

**А.А. Воронов**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Физическая кинетика
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра теоретической физики им. Л.Д. Ландау
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

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

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 30 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 45 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Количество контрольных работ, заданий: 4

Программу составил: И.Я. Полищук, д-р физ.-мат. наук, профессор, профессор

Программа обсуждена на заседании кафедры теоретической физики им. Л.Д. Ландау 17.05.2025

## Аннотация

В курсе излагаются теоретические основы физической кинетики. Особое внимание уделяется физической интерпретации полученных результатов. Предполагается, что успешно освоившие материал курса, получают достаточную подготовку для чтения специальной и оригинальной литературы, для понимания которой необходимо владеть методами физической кинетики. Лекционный и семинарский материал предназначен как для теоретиков, так и для экспериментаторов

В основе курса лежит метод кинетического уравнения, которое вначале применяется для вязкости и теплопроводности в разреженных нейтральных газах. В этой части курса вид интеграла столкновений устанавливается на основе гипотезы о молекулярном хаосе (Stosszahlansatz). Далее изучается уравнение Смолуховского, уравнение Ланжевена, уравнение Фоккера-Планка и их применение для расчета различных кинетических коэффициентов. Затем излагается физическая кинетика кристаллических систем, как диэлектриков, так и металлов. При этом изучаются различные механизмы рассеяния электронов и фононов. Далее излагается теория линейного отклика с привлечением метода двухвременных функций Грина. На простейших примерах показывается эффективность такого подхода. И, наконец, рассматривается физическая кинетика низкотемпературной невырожденной плазмы.

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

дать студентам знания об основах физической кинетики. Это предполагает феноменологический вывод на физическом уровне строгости кинетического уравнения для различных физических систем, имеющих большое прикладное значение. В качестве объектов, которые будут изучены в процессе курса, выбраны нейтральные газы, кристаллические системы, многокомпонентные системы, разреженная низкотемпературная плазма.

### Задачи дисциплины

- применить метод кинетического уравнения для вывода основных уравнений гидродинамики и рассмотрения частного случая приближения идеальной жидкости;
- научиться в общем виде получать выражения, для расчета основных кинетических коэффициентов: вязкости, теплопроводности, диффузии, термодиффузии, электропроводности, термо-ЭДС и т.д.;
- изложить подход «тау –приближения», основанного на гипотезе локально-равновесного распределения, для расчета кинетических коэффициентов в различных средах: нейтральных газах, диэлектриках, металлах;
- изложение метода двухвременных температурных функций Грина;
- применить метод функций Грина для теории линейного отклика;
- методом кинетического уравнения в пренебрежении столкновениями изучить основные кинетические явления в плазме. С этой целью будет изучена система уравнений Власова и получено его линеаризованное решения. Это позволит проанализировать спектр собственных колебаний плазмы изучить затухание Ландау, пучковую неустойчивость;
- дать физическую интерпретацию получаемых аналитических результатов.

## 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)

ОПК-5 Способен и готов к повышению квалификации, профессиональному росту и руководству коллективом в сфере своей профессиональной деятельности, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия	ОПК-5.1 Способен работать в коллективе, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия
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-2 Способен самостоятельно или в качестве члена (руководителя) малого коллектива организовывать и проводить научные исследования и их апробацию	ПК-2.1 Способен планировать и проводить научные исследования самостоятельно или в составе научного коллектива
ПК-3 Способен профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием (приборами и установками, специализированными пакетами прикладных программ) в избранной предметной области	ПК-3.1 Понимает принципы работы используемого оборудования (специализированных пакетов прикладных программ)

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

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- основные фундаментальные и прикладные аспекты основных стандартных методов физической кинетики;
- ключевые положения и область применимости метода кинетического уравнения;
- основы метода двухвременных функций Грина;
- различные подходы в теории линейного отклика;
- ключевые положения кинетической теории, лежащие в основе физики плазмы.

уметь:

- вычислять основные кинетические коэффициенты в нейтральном бoльцмановском газе;
- вычислять основные кинетические коэффициенты в кристаллических диэлектриках;
- вычислять основные кинетические коэффициенты в металлах;
- интерпретировать основные физические результаты, полученные теоретически, различными подходами;
- использовать полученные знания для чтения специальной и оригинальной литературы, в которой теоретически и экспериментально исследуются явления переноса.

владеть:

- основными методами расчета кинетических свойств разреженных и конденсированных сред;
- математическим аппаратом, связанным с теорией кинетических уравнений;
- математическим аппаратом теории линейного отклика в его различных реализациях;
- основами теории случайных 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	Общая теория кинетических явлений в нейтральных газах	4	4		6
2	Основные приближенные методы в теории кинетических уравнений	2	2		6
3	Кинетические явления в диэлектриках	4	4		5
4	Кинетические явления в металлах	4	4		6
5	Диффузионное приближение	4	4		5
6	Кинетические явления в плазме	4	4		6
7	Кинетика аморфных систем	4	4		5
8	Теория линейного отклика	4	4		6
Итого часов		30	30		45
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		135 час., 3 зач.ед.			

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

##### Семестр: 1 (Осенний)

##### 1. Общая теория кинетических явлений в нейтральных газах

Функция распределения в квазиклассической теории. Связь функции распределения с основными макроскопическими параметрами. Уравнение Лиувилля. Кинетическое уравнение Больцмана для нейтральных одноатомных газов. Гипотеза «молекулярного хаоса». Интеграл столкновений в форме Больцмана. Свойства интеграла столкновений в форме Больцмана. H-теорема Больцмана. Характерные параметры в кинетике нейтральных газов. Границы применимости уравнения Больцмана для молекулярных газов. Закон унитарности столкновений и принцип детального равновесия. Уравнения гидродинамики: уравнение непрерывности, уравнение Навье-Стокса, уравнение переноса энергии.

##### 2. Основные приближенные методы в теории кинетических уравнений

Гипотеза о локально-равновесном распределении. Связь истинной функцией распределения и локально-равновесной функцией распределения. "Паразитные" решения. Гидродинамика идеальной жидкости: уравнение Эйлера, уравнение переноса энергии для локально-равновесного распределения. Отсутствие диссипативных процессов для локально-равновесного распределения. Приближение времени релаксации:  $\tau$ -приближение. Основные свойства интеграла столкновений в  $\tau$ -приближении. Решение кинетического уравнения с учетом диссипативных процессов. Линеаризация интеграла столкновений. Обоснование  $\tau$ -приближения. Теплопроводность одноатомных газов. Вязкость одноатомных газов. Влияние внутренних степеней свободы молекул на поведение кинетических коэффициентов. Оценки коэффициентов переноса в различных приближениях.

##### 3. Кинетические явления в диэлектриках

Кинетическое уравнение для фононов. Анггармонизм и интеграл столкновений при рассеянии фононов друг на друге. Различные механизмы рассеяния фононов. Теплопроводность диэлектриков. Роль процессов переброса (парадокс Пайерлса).

##### 4. Кинетические явления в металлах

Особенности кинетического уравнения для электронов в металлах. Электрический ток, поток энергии и поток тепла. Электропроводность, эффект Холла, эффект Зеебека, эффект Пельтье и теплопроводность в  $\tau$ -приближении. Соотношение Томсона. Интеграл столкновений при рассеянии электронов металла на примесях и H-теорема. Вычисление остаточного сопротивления. Интеграл столкновений при рассеянии электронов металла на фононах, роль процессов переброса и зависимость электросопротивления от температуры.

## 5. Диффузионное приближение

Уравнение Смолуховского. Уравнение Ланжевена. Уравнение Фоккера-Планка. Применение уравнения Фоккера-Планка для изучения коэффициентов переноса легкого газа в тяжелом и тяжелого газа в легком. Подвижность. Соотношения Эйнштейна.

## 6. Кинетические явления в плазме

Основные параметры и термодинамические свойства низкотемпературной плазмы. Пространственная и временная дисперсия плазмы. Диэлектрическая проницаемость плазмы. Диффузионное приближение. Продольная и поперечная диэлектрическая проницаемость. Система уравнений Власова для электронной невырожденной плазмы в «модели желе». Равновесное решение уравнений Власова. Решение линеаризованного уравнения Власова. Собственные колебания плазмы. Физический смысл собственных колебаний плазмы. Затухание Ландау. Условие применимости линеаризованного уравнения Власова. Пучковая неустойчивость плазмы. Амбиполярная диффузия.

## 7. Кинетика аморфных систем

Туннельная модель. Взаимодействие двухуровневых систем (ДУС) с фононами. Однофононная релаксация ДУС. Релаксация фононов на ДУС. Низкотемпературная теплопроводность аморфных систем. Зависимость теплоемкости аморфных систем от времени. Насыщение резонансного поглощения. Диэлектрическая проницаемость аморфных систем. Прыжковая проводимость. Закон Мотта. Кулоновская щель. Закон Шкловского-Эфроса.

## 8. Теория линейного отклика

Матрица плотности. Отклик на механическое возмущение. Двухвременные запаздывающие функции Грина и флуктуационно-диссипационная теорема. Отклик на электрическое поле. Электропроводность. Броуновское движение. Уравнение Блоха и электронный парамагнитный резонанс (ЭПР).

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

Стандартная учебная аудитория, желательно с мультимедийным оборудованием (проектор).

## 6. Перечень рекомендуемой литературы

### Основная литература

1. Лекции по физической кинетике / Л. А. Максимов, И. Я. Полищук. – Москва: МЦНМО, 2024
2. Лекции по статистической физике [Текст] : учеб. пособие для вузов / Л. А. Максимов, А. В. Михеенков, И. Я. Полищук ; М-во образования и науки РФ, Моск. физ.-техн. ин-т (гос. ун-т) .— 2-е изд., испр. — М. : МФТИ, 2015 .— 320 с.
3. Физическая кинетика [Текст] : учеб. пособие для вузов / Е. М. Лифшиц, Л. П. Питаевский .— М. : Наука, 1979 .— 528 с.

### Дополнительная литература

1. Задачи по физической кинетике / С. Н. Бурмистров. – Долгопрудный: Интеллект, 2016.
2. Основы теории металлов [Текст] / А. А. Абрикосов, М., Физматлит, 2009, 2010

## 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)**

Программное обеспечение и информационные технологии не требуются.

**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 и понятия, 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:** Общая и прикладная физика  
Физтех-школа физики и исследований им. Ландау  
кафедра теоретической физики им. Л.Д. Ландау  
**курс:** 1  
**квалификация:** магистр

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

**Разработчик:** И.Я. Полищук, д-р физ.-мат. наук, профессор, профессор

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)
ОПК-5 Способен и готов к повышению квалификации, профессиональному росту и руководству коллективом в сфере своей профессиональной деятельности, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия	ОПК-5.1 Способен работать в коллективе, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия
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-2 Способен самостоятельно или в качестве члена (руководителя) малого коллектива организовывать и проводить научные исследования и их апробацию	ПК-2.1 Способен планировать и проводить научные исследования самостоятельно или в составе научного коллектива
ПК-3 Способен профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием (приборами и установками, специализированными пакетами прикладных программ) в избранной предметной области	ПК-3.1 Понимает принципы работы используемого оборудования (специализированных пакетов прикладных программ)

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Физическая кинетика» обучающийся должен:

### знать:

- основные фундаментальные и прикладные аспекты основных стандартных методов физической кинетики;
- ключевые положения и область применимости метода кинетического уравнения;
- основы метода двухвременных функций Грина;
- различные подходы в теории линейного отклика;
- ключевые положения кинетической теории, лежащие в основе физики плазмы.

### уметь:

- вычислять основные кинетические коэффициенты в нейтральном бoльцмановском газе;
- вычислять основные кинетические коэффициенты в кристаллических диэлектриках;
- вычислять основные кинетические коэффициенты в металлах;
- интерпретировать основные физические результаты, полученные теоретически, различными подходами;
- использовать полученные знания для чтения специальной и оригинальной литературы, в которой теоретически и экспериментально исследуются явления переноса.

### владеть:

- основными методами расчета кинетических свойств разреженных и конденсированных сред;
- математическим аппаратом, связанным с теорией кинетических уравнений;
- математическим аппаратом теории линейного отклика в его различных реализациях;
- основами теории случайных процессов.

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

1. Основные идеи в теории кинетических уравнений.
2. Уравнение Лиувилля
3. Интеграл столкновений
4. Приближение времени релаксации
5. Кинетические коэффициенты
6. Диффузионное приближение
7. Уравнение Смолуховского
8. Уравнение Фоккера-Планка
9. Уравнение Власова
10. Матрица плотности
11. Запаздывающая функция Грина
12. Диэлектрическая проницаемость плазмы

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

1. Доказать, что локально-равновесное распределение Максвелла обращает в нуль интеграл столкновений.
2. Доказать H-теорему Больцмана для газа сталкивающихся молекул.
3. Вывести уравнение Эйлера из уравнения Навье—Стокса.
4. Доказать, что при локально-равновесном распределении отсутствует теплопроводность.
5. Доказать, что H-теорема Больцмана справедлива в приближении времени релаксации.
6. Вычислить коэффициент вязкости одноатомного газа в приближении времени релаксации.
7. Вычислить коэффициент теплопроводности одноатомного газа в приближении времени релаксации.
8. Вычислить и сравнить коэффициенты температуропроводности и кинематической вязкости в приближении времени релаксации.
9. Вычислить коэффициент диффузии легкого газа в тяжелом.
10. Вычислить коэффициент термо-диффузии легкого газа в тяжелом (считая известным сечение столкновения).
10. Вычислить коэффициент диффузии тяжелого газа в легком, используя соотношение Эйнштейна (считая известным сечение столкновения)
11. Оценить коэффициент диффузии в смеси двух газов легкого и тяжелого, рассматривая частицы как твердые упругие шарики диаметром  $D_1$  и  $D_2$ .
12. В приближении времени релаксации найти электропроводность, теплопроводность, коэффициент диффузии невырожденного электронного газа и доказать закон Видемана-Франца.
13. Найти распределение концентрации легкого газа в тяжелом в неравномерно нагретом тяжелом газе в отсутствие диффузионного потока.

#### **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 выставлении итоговой оценки за экзамен учитывается работа в семестре, что подразумевает активность на практических занятиях, в частности решение задач из задания. Чтобы стимулировать подобную активность студентам предлагается заранее, в процессе самостоятельной работы, готовить решение задач и рассказать их на одном из семинаров.

Студенты, допущенные к экзамену, отвечают на вопросы билета, имея возможность на подготовку не менее 1 часа. Ответы представляются в письменном виде, по которым проводится устное собеседование.

Экзамен оценивается, в зависимости от полноты ответа и глубины понимания материала, по 50 балльной шкале: 1-й вопрос - максимум 50 баллов,

2-й вопрос)– максимум 20 баллов, 3-й вопрос максимум 30 баллов

Во время проведения экзамена студенты могут пользоваться программой дисциплины и сборниками домашних заданий, а также учебной, учебно-методической и справочной литературой

Перед началом экзаменационной сессии студенты получают перечень вопросов, ответы на которые необходимо знать для успешной сдачи экзамена. Формулировки вопросов в билетах студенты узнают перед экзаменом у лектора или на сайте кафедры.