

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

**УТВЕРЖДЕНО**

**и.о. директора физтех-школы  
физики и исследований им.  
Ландау**

**А.А. Воронов**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Кинетическая теория процессов переноса веществ и энергии
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Суперкомпьютерное моделирование ядерных процессов и технологий Физтех-школа природоподобных, плазменных и ядерных технологий им. И.В. Курчатова кафедра моделирования ядерных процессов и технологий
<b>курс:</b>	4
<b>квалификация:</b>	бакалавр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 8 (весенний) - 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:

Ю.Ю. Клосс, д-р физ.-мат. наук, доцент

Ф.Г. Черемисин, д-р физ.-мат. наук, профессор

Программа обсуждена на заседании кафедры моделирования ядерных процессов и технологий 18.05.2020

## Аннотация

Студенты, изучающие курс «Кинетическая теория процессов переноса вещества и энергии» должны овладеть общим понятийным аппаратом и научиться применять теоретические знания на практике. В результате изучения дисциплины студент должен иметь основные представления о физических процессах, лежащих в основе кинетической теории Больцмана, уметь задавать граничные условия для различных задач кинетической теории, рассчитывать и анализировать газокинетические процессы переноса, рассчитывать основные физические характеристики газокинетических процессов. Показателем владения материалом служит умение решать задачи и ориентироваться в круге вопросов, связанных с проблемами течений неразрезанного газа в микроструктурах. Для формирования умения применять теоретические знания на практике студенту необходима разработка программ и алгоритмов численного решения уравнения Больцмана.

### 1. Цели и задачи

#### Цель дисциплины

- знакомство с молекулярной структурой газовой среды, основами строгой кинетической теории газов, консервативным вычислением оператора столкновений проекционным методом, постановкой краевых задач и методами решения уравнения Больцмана;
- знакомство с понятием вязкости и теплопроводности газа. Вывод условия применимости уравнений гидродинамики. Изложение системы уравнений для моментов от функции распределения.

#### Задачи дисциплины

- формирование базовых знаний в области физики переноса массы и энергии на основе кинетического уравнения Больцмана;
- обучение студентов основным методам и подходам, используемым в кинетической теории, изучение базовых принципов кинетической теории, основанной на уравнении Больцмана;
- формирование подходов, основанных на конечно-разностных аппроксимациях оператора адвекции кинетического уравнения, расщепление кинетического уравнения по физическим процессам. Дискретная реализация начальных и граничных условий.

### 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
ОПК-1 Способен применять фундаментальные знания, полученные в области физико-математических и (или) естественных наук, и использовать их в профессиональной деятельности	ОПК-1.1 Способен анализировать поставленную задачу, намечать пути ее решения
	ОПК-1.2 Способен строить математические модели, производить количественные расчеты и оценки
	ОПК-1.3 Способен определять границы применимости полученных результатов
ОПК-2 Способен использовать современные информационные технологии и программные средства при решении задач профессиональной деятельности, соблюдая требования информационной безопасности	ОПК-2.1 Способен применять современные вычислительную технику и сервисы сети Интернет в области (сфере) профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Знает и умеет применять численные математические методы и прикладное программное обеспечение для решения научных задач в профессиональной области
ПК-1 Способен планировать и проводить научные эксперименты (в избранной предметной области) и (или) теоретические	ПК-1.1 Владеет фундаментальными понятиями, законами и теориями современной физики
	ПК-1.3 Владеет культурой постановки научной задачи и моделирования естественнонаучных объектов и систем

(аналитические и имитационные) исследования	ПК-1.8 Владеет навыками работы с современными языками программирования и программными пакетами для научных расчетов
ПК-3 Способен выбирать и применять подходящее оборудование, инструменты и методы исследований для решения задач в избранной предметной области	ПК-3.3 Умеет производить оценку точности численных методов, используемых на ЭВМ, вычислительной сложности используемых алгоритмов и объема требуемых вычислительных ресурсов
ПК-4 Способен критически оценивать применимость используемых методик и методов	ПК-4.1 Знает численные порядки величин, характерных для соответствующей профессиональной области
	ПК-4.2 Знает источники происхождения и умеет производить оценку погрешности измерений и достоверности экспериментальных результатов
	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:

- принципы и методы кинетической теории Больцмана, получения когерентного излучения, физические явления, лежащие в основе методов переноса газов и излучения в сложных средах и композициях.

уметь:

- численно решать кинетическое уравнение.

владеть:

- методами компьютерного моделирования газокинетических процессов, методами разработки проблемно-моделирующих сред на современных суперкомпьютерных системах.

### 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	Кинетические уравнения для смеси газов и для молекулярных газов.	4			4
2	Кинетическое уравнение для переноса излучения.	4			4
3	Макроскопические следствия уравнения Больцмана.	4			4
4	Молекулярная структура газовой среды.	4			4
5	Оператор столкновений для одноатомного газа.	4			4
6	Основы строгой кинетической теории газов.	3			3
7	Постановка краевых задач и методы решения уравнения Больцмана.	3			3
8	Энергетическое распределение излучения.	4			4
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: 8 (Весенний)

##### 1. Кинетические уравнения для смеси газов и для молекулярных газов.

- Система кинетических уравнений для смеси газов.
- Вращательные уровни энергии многоатомных молекул.
- Колебательные уровни энергии многоатомных молекул.
- Обобщенное кинетическое уравнение для газа с внутренними степенями свободы.

##### 2. Кинетическое уравнение для переноса излучения.

- Вывод кинетического уравнения переноса излучения.
- Интегральная форма уравнения переноса излучения.
- Диффузионное приближение.
- Граничные условия для уравнения переноса излучения.

##### 3. Макроскопические следствия уравнения Больцмана.

- Уравнения переноса Максвелла.
- Вывод уравнений гидродинамики Эйлера и Навье-Стокса.
- Вязкость и теплопроводность газа.
- Условия применимости уравнений гидродинамики.
- Система уравнений для моментов от функции распределения.

##### 4. Молекулярная структура газовой среды.

- Основные физические характеристики газа.
- Молекулярные потенциалы.
- Бинарные столкновения и длина свободного пробега молекул.
- Критерии разреженности газа.
- Элементарная теория процессов переноса в газе.

##### 5. Оператор столкновений для одноатомного газа.

- Формулы преобразования скоростей при бинарных столкновениях.
- Основные свойства оператора столкновений.
- H-теорема и необратимость.
- Консервативное вычисление оператора столкновений проекционным методом.

##### 6. Основы строгой кинетической теории газов.

- Функция распределения молекулярных скоростей.
- Определение макропараметров газа по функции распределения.
- Газ в состоянии термодинамического равновесия.
- Кинетическое уравнение Больцмана для одноатомного газа.
- Классический вывод уравнения Больцмана.
- Вывод уравнения Больцмана из уравнения Лиувилля.
- Пределы применимости уравнения Больцмана.

## 7. Постановка краевых задач и методы решения уравнения Больцмана.

- Взаимодействие газа с поверхностью твердого тела.
- Постановка граничных условий для кинетического уравнения.
- Безразмерные величины и критерии подобия.
- Кинетическое уравнение в безразмерных переменных.
- Решение уравнения Больцмана методом дискретных ординат.

## 8. Энергетическое распределение излучения.

- Энергетический спектр замедления.
- Резонансное поглощение.
- Термализация.

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

Учебная аудитория, оснащенная рабочими станциями, объединенными в сеть.

## 6. Перечень рекомендуемой литературы

### Основная литература

1. Теоретическая физика [Текст] : в 10 т. Т. 10 : Физическая кинетика : учеб. пособие для вузов / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц ; под ред. Л. П. Питаевского .— 2-е изд., испр. — М. : Физматлит, 2001, 2002, 2007 .— 536 с.
2. Теоретическая физика [Текст] : в 10 т. Т. 5, Ч. 1 : Статистическая физика : учеб. пособие для ун-тов / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц ; под ред. Л. П. Питаевского .— 5-е изд., стереотип. — М. : Физматлит, 2001, 2002, 2005, 2010 .— 616 с.
3. Динамика разреженного газа. Кинетическая теория [Текст]/М. Н. Коган, -М., Наука, 1967
4. Математическая теория неоднородных газов [Текст] = The mathematical theory of non-uniform gases, монография/С. Чепмен, Т. Каулинг , -М, Изд-во иностр. лит., 1960
5. Математическая теория процессов переноса в газах [Текст]/Дж. Ферцигер, Г. Капер , -М., Мир, 1976
6. Людвиг Больцман, 1844-1906 [Текст]/Л. С. Полак, -М., Наука, 1987

### Дополнительная литература

1. Численные методы расчета ядерных реакторов [Текст], монография/Г. И. Марчук, -М., Атомиздат, 1995
2. Д.Белл, С. Глесстон, Теория ядерных реакторов, - М.: Атомиздат, 1974.
3. А.Д.Франк-Каменецкий, Моделирование траекторий нейтронов при расчете реакторов методом Монте-Карло, Физика ядерных реакторов, - М.: Атомиздат, 1978г.

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

<http://lib.mipt.ru/catalogue/1604/?t=492> – электронная библиотека Физтеха

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

На лекционных занятиях используются мультимедийные технологии, включая демонстрацию презентаций. В процессе самостоятельной работы обучающиеся используют такие информационные технологии как GMSH, MPI, OpenGL.

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

В результате изучения дисциплины студент должен иметь основные представления о физических процессах, лежащих в основе кинетической теории Больцмана, уметь задавать граничные условия для различных задач кинетической теории, рассчитывать и анализировать газокINETические процессы теплопереноса, рассчитывать основные физические характеристики газокINETических процессов, знать области применения компьютерного моделирования к Кнудсеновским микронасосам различного типа. Студент должен овладеть проекционным методом вычисления интеграла столкновений, уметь на основе этого подхода создавать компьютерные модели для описания газокINETических процессов в микроустройствах. Показателем владения материалом служит умение решать задачи и ориентироваться в круге вопросов, связанных с проблемами течений неразрезанного газа в микроструктурах. Для формирования умения применять теоретические знания на практике студенту необходима разработка программ и алгоритмов численного решения уравнения Больцмана.

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 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.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Суперкомпьютерное моделирование ядерных процессов и технологий Физтех-школа природоподобных, плазменных и ядерных технологий им. И.В. Курчатова кафедра моделирования ядерных процессов и технологий
<b>курс:</b>	<u>4</u>
<b>квалификация:</b>	бакалавр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 8 (весенний) - Экзамен

#### Разработчики:

Ю.Ю. Клосс, д-р физ.-мат. наук, доцент

Ф.Г. Черемисин, 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
ОПК-1 Способен применять фундаментальные знания, полученные в области физико-математических и (или) естественных наук, и использовать их в профессиональной деятельности	ОПК-1.1 Способен анализировать поставленную задачу, намечать пути ее решения
	ОПК-1.2 Способен строить математические модели, производить количественные расчеты и оценки
	ОПК-1.3 Способен определять границы применимости полученных результатов
ОПК-2 Способен использовать современные информационные технологии и программные средства при решении задач профессиональной деятельности, соблюдая требования информационной безопасности	ОПК-2.1 Способен применять современные вычислительную технику и сервисы сети Интернет в области (сфере) профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Знает и умеет применять численные математические методы и прикладное программное обеспечение для решения научных задач в профессиональной области
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-1.3 Владеет культурой постановки научной задачи и моделирования естественнонаучных объектов и систем
	ПК-1.8 Владеет навыками работы с современными языками программирования и программными пакетами для научных расчетов
ПК-3 Способен выбирать и применять подходящее оборудование, инструменты и методы исследований для решения задач в избранной предметной области	ПК-3.3 Умеет производить оценку точности численных методов, используемых на ЭВМ, вычислительной сложности используемых алгоритмов и объема требуемых вычислительных ресурсов
ПК-4 Способен критически оценивать применимость используемых методик и методов	ПК-4.1 Знает численные порядки величин, характерных для соответствующей профессиональной области
	ПК-4.2 Знает источники происхождения и умеет производить оценку погрешности измерений и достоверности экспериментальных результатов
	ПК-4.3 Способен обосновать причинно-следственные отношения используемых понятий и моделей

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Кинетическая теория процессов переноса веществ и энергии» обучающийся должен:

### знать:

- принципы и методы кинетической теории Больцмана, получения когерентного излучения, физические явления, лежащие в основе методов переноса газов и излучения в сложных средах и композициях.

### уметь:

- численно решать кинетическое уравнение.

### владеть:

- методами компьютерного моделирования газокинетических процессов, методами разработки проблемно-моделирующих сред на современных суперкомпьютерных системах.

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



Не предусмотрено.

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

Перечень контрольных вопросов для сдачи экзамена в 8-ом семестре:

1. Общий вид кинетического уравнения Больцмана.
2. Функция распределения.
3. Уравнение адвекции.
4. Левая часть кинетического уравнения.
5. Безразмерные величины и критерии подобия
6. Число Кнудсена и характерные размеры системы.
7. Длина свободного пробега.
8. Конечно-разностные аппроксимации оператора адвекции.
9. Интегральные формы кинетического уравнения.
10. Пространственно-скоростная сетка.
11. Расщепление по физическим процессам.
12. Граничные условия на поверхности твёрдого тела.
13. Граничные условия на поверхностях симметрии течения.
14. Консервативный проекционный метод.
15. Многомерные кубатурные сетки Коробова.
16. Молекулярные потенциалы.
17. Интеграл столкновений для смесей газов.
18. Дискретное кинетическое уравнение.
19. Проекционный метод вычисления интеграла столкновений с учётом поступательно-вращательного и поступательно-колебательного переноса энергии.
20. Примеры микро и нано устройств.
21. Релаксационная модель.
22. Методы решения уравнения диффузии.
23. Метод дискретных ординат для решения уравнения переноса.
24. Метод Монте-Карло.
25. Групповое приближение и групповые константы.

Примеры экзаменационных билетов:

Билет 1.

- 1 Молекулярные потенциалы.
2. Интеграл столкновений для смесей газов.

Билет 2.

1. Дискретное кинетическое уравнение.
2. Проекционный метод вычисления интеграла столкновений с учётом поступательно-вращательного и поступательно-колебательного переноса энергии.

Билет 3.

1. Тестирование реализации метода.
2. Задача теплопроводности. Структура ударной волны.

Билет 4.

1. Релаксационная модель.
2. Методы решения уравнения диффузии.

Билет 5.

1. Метод дискретных ординат для решения уравнения переноса.
2. Метод Монте-Карло. Групповое приближение и групповые константы.

## 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 недочётами.

Оценка "хорошо" (7 баллов) выставляется студенту, если он твёрдо 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 твёрдо 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 оценивания знаний обучающемуся предоставляется время на подготовку на усмотрение экзаменатора. Опрос обучающегося по билету на устном экзамене не должен превышать одного астрономического часа. Оценивание знаний производится в соответствии с вышеуказанными критериями в соответствии с содержанием дисциплины.