

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

**УТВЕРЖДЕНО**

**Директор физтех-школы физики  
и исследований им. Ландау  
А.В. Рогачев**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Моделирование газокINETических процессов в микро- и наноустройствах
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра моделирования ядерных процессов и технологий
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

- 1 (осенний) - Дифференцированный зачет
- 2 (весенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

- лекции: 60 час.
- семинары: 0 час.
- лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 135 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 225, всего зач. ед.: 5

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 04.04.2022

## Аннотация

Студенты, изучающие курс «Моделирование и газокINETических процессов в микро- и наноустройствах», 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 газокINETические процессы тепломассопереноса, рассчитывать основные физические характеристики газокINETических процессов, знать области применения компьютерного моделирования к Кнудсеновским микронасосам различного типа.

### 1. Цели и задачи

#### Цель дисциплины

В курсе лекций представлены основные методы моделирования газокINETических процессов в микроструктурах на основе численных методов решения кинетического уравнения Больцмана. Изложены математические модели систем типа мембранный микрофильтр, вакуумные микронасосы на эффекте термотранспирации, компьютерная модель эксперимента Кнудсена

#### 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 Больцман;
- 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 критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	УК-1.1 Анализирует проблемную ситуацию как систему, выявляя ее составляющие и связи между ними
	УК-1.2 Осуществляет поиск вариантов решения поставленной проблемной ситуации на основе доступных источников информации
	УК-1.3 Разрабатывает стратегию достижения поставленной цели как последовательность шагов, предвидя результат каждого из них и оценивая их влияние на внешнее окружение планируемой деятельности и на взаимоотношения участников этой деятельности
УК-2 Способен управлять проектом на всех этапах его реализации	УК-2.1 Формулирует в рамках обозначенной проблемы, цель, задачи, актуальность, значимость (научную, практическую, методическую и иную в зависимости от типа проекта), ожидаемые результаты и возможные сферы их применения
	УК-2.2 Способен прогнозировать результат деятельности и планировать последовательность шагов для достижения данного результата. Формирует план-график реализации проекта в целом и план контроля его выполнения
	УК-2.3 Способен организовать и координировать работу участников проекта, обеспечивать работу команды необходимыми ресурсами

УК-3 Способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной задачи	УК-3.2 Учитывает в своей социальной и профессиональной деятельности интересы, особенности поведения и мнения (включая критические) людей, с которыми работает/взаимодействует, в том числе посредством корректировки своих действий
	УК-3.3 Способен предвидеть результаты (последствия) как личных, так и коллективных действий
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
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-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
	ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)
	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.1 Способен применять знания и навыки по использованию информационно-коммуникационных технологий для поиска и изучения научной литературы, применения прикладных программных продуктов
	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
	ОПК-4.3 Способен аргументировано выбирать способ проведения научного исследования

### 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 модуляции лазерного излучения, основные свойства лазерного излучения.

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	Кинетическое уравнение.	7			15

2	Описание процессов переноса массы и энергии на основе уравнения Больцмана.	8			15
3	Расщепление кинетического уравнения по физическим процессам.	7			15
4	Консервативные конечно-разностные схемы.	8			15
5	Интегральные формы кинетического уравнения Больцмана.	15			37
6	Граничные условия на поверхностях симметрии течения.	15			38
Итого часов		60			135
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		225 час., 5 зач.ед.			

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

##### Семестр: 1 (Осенний)

###### 1. Кинетическое уравнение.

Консервативный проекционный метод. Многомерные кубатурные сетки Коробова и их преимущество. Скорости после столкновения для произвольного молекулярного потенциала. Обобщение метода для смеси газов. Решение дискретного кинетического уравнения.

###### 2. Описание процессов переноса массы и энергии на основе уравнения Больцмана.

Проекционный метод вычисления интеграла столкновений с учётом поступательно-вращательного и поступательно-колебательного переноса энергии. Простая релаксационная модель поступательно-вращательного переноса энергии. Решение системы кинетических уравнений для газа с внутренними степенями свободы молекул.

###### 3. Расщепление кинетического уравнения по физическим процессам.

Мембранный микро фильтр. Кнудсеновский компрессор. Насос из перемежающихся разно нагретых пластин. Микро ротатор (радиометр Крука). Компьютерная модель эксперимента Кнудсена 1910 г.

###### 4. Консервативные конечно-разностные схемы.

Методы решения уравнения диффузии. Метод дискретных ординат для решения уравнения переноса. Метод характеристик для решения уравнения переноса. Метод вероятности первых столкновений. Метод Монте-Карло. Групповое приближение и групповые константы.

Дискретная реализация начальных и граничных условий.

##### Семестр: 2 (Весенний)

###### 5. Интегральные формы кинетического уравнения Больцмана.

Интегральные формы кинетического уравнения Больцмана. Кинетическое уравнение для молекулярных газов. Аппроксимация уравнения Больцмана на пространственно-скоростной сетке узлов.

###### 6. Граничные условия на поверхностях симметрии течения.

Граничные условия на поверхностях симметрии течения. Консервативная формулировка граничных условий.

## **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

### Дополнительная литература

1. Г.И.Марчук, Методы расчета ядерных реакторов, М.,1961г.
2. Д.Белл, С. Глестон 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)**

[www.nndc.bnl.gov](http://www.nndc.bnl.gov) [www.lanl.gov](http://www.lanl.gov)

## **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.

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

Студенты, изучающие курс «Моделирование и газокинетических процессов в микро- и наноустройствах», 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 тепломассопереноса, рассчитывать основные физические характеристики газокинетических 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 газокинетических 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.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра моделирования ядерных процессов и технологий
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

- 1 (осенний) - Дифференцированный зачет
- 2 (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 критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	УК-1.1 Анализирует проблемную ситуацию как систему, выявляя ее составляющие и связи между ними
	УК-1.2 Осуществляет поиск вариантов решения поставленной проблемной ситуации на основе доступных источников информации
	УК-1.3 Разрабатывает стратегию достижения поставленной цели как последовательность шагов, предвидя результат каждого из них и оценивая их влияние на внешнее окружение планируемой деятельности и на взаимоотношения участников этой деятельности
УК-2 Способен управлять проектом на всех этапах его реализации	УК-2.1 Формулирует в рамках обозначенной проблемы, цель, задачи, актуальность, значимость (научную, практическую, методическую и иную в зависимости от типа проекта), ожидаемые результаты и возможные сферы их применения
	УК-2.2 Способен прогнозировать результат деятельности и планировать последовательность шагов для достижения данного результата. Формирует план-график реализации проекта в целом и план контроля его выполнения
	УК-2.3 Способен организовать и координировать работу участников проекта, обеспечивать работу команды необходимыми ресурсами
УК-3 Способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной задачи	УК-3.2 Учитывает в своей социальной и профессиональной деятельности интересы, особенности поведения и мнения (включая критические) людей, с которыми работает/взаимодействует, в том числе посредством корректировки своих действий
	УК-3.3 Способен предвидеть результаты (последствия) как личных, так и коллективных действий
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
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-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
	ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)
	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.1 Способен применять знания и навыки по использованию информационно-коммуникационных технологий для поиска и изучения научной литературы, применения прикладных программных продуктов
	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов



## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Моделирование газокинетических процессов в микро- и наноустройствах» обучающийся должен:

### знать:

принципы и методы кинетической теории Больцмана, получения когерентного излучения, физические явления, лежащие в основе методов модуляции лазерного излучения, основные свойства лазерного излучения.

### 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

Вопросы для подготовки к дифференцированному зачету в 9 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.

Вопросы для подготовки к экзамену в 10 семестре:

1. Интегральные формы кинетического уравнения.
2. Пространственно-скоростная сетка.
3. Расщепление по физическим процессам.
4. Граничные условия на поверхности твёрдого тела.
5. Граничные условия на поверхностях симметрии течения.
6. Консервативный проекционный метод.
7. Многомерные кубатурные сетки Коробова.
8. Молекулярные потенциалы.
9. Интеграл столкновений для смесей газов.
10. Дискретное кинетическое уравнение.
11. Учёт поступательно- вращательного и поступательно-колебательного переноса энергии.
12. Примеры микро и нано устройств.
13. Релаксационная модель.
14. Методы решения уравнения диффузии
15. Метод дискретных ординат для решения уравнения переноса.
16. Метод Монте-Карло.
17. Групповое приближение и групповые константы.

Примеры экзаменационных билетов в 10-ом семестре:

Билет 1.

1. Расщепление по физическим процессам.
2. Граничные условия на поверхности твёрдого тела.

Билет 2.

1. Граничные условия на поверхностях симметрии течения.
2. Консервативный проекционный метод.

Билет 3.

1. Многомерные кубатурные сетки Коробова.
2. Молекулярные потенциалы.

Билет 4.

1. Интеграл столкновений для смесей газов.
2. Дискретное кинетическое уравнение.

#### 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 дифференцированном зачете и экзамене не должен превышать одного астрономического часа. Оценивание знаний производится в соответствии с вышеуказанными критериями в соответствии с содержанием дисциплины.