

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

УТВЕРЖДЕНО

**Директор физтех-школы
природоподобных, плазменных и
ядерных технологий им. И.В.
Курчатова**

Т.Е. Григорьев

Рабочая программа дисциплины (модуля)

по дисциплине:	Методы анализа газокINETических процессов на основе уравнения Больцмана
по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Суперкомпьютерное моделирование в прикладной физике Физтех-школа природоподобных, плазменных и ядерных технологий им. И.В. Курчатова кафедра моделирования ядерных процессов и технологий
курс:	1
квалификация:	магистр

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

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 15 час.

семинары: 15 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 75 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Программу составил: В.Ф. Цибульский, д-р техн. наук, старший научный сотрудник

Программа обсуждена на заседании кафедры моделирования ядерных процессов и технологий 30.04.2025

Аннотация

В курсе лекций представлены основные методы моделирования газокинетических 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 1910 г.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

- 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.

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-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-2.4 Представляет публично результаты проекта (или отдельных его этапов) в форме отчетов, статей, выступлений на научно-практических конференциях, семинарах и т.п.
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
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость

на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
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-4.2 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
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
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:

- принципы и методы кинетической теории Больцмана;
- проекционный метод вычисления интеграла столкновений;
- методы решения уравнения адвекции на сетках различного типа;
- метод Коробова;
- метод расщепления.

уметь:

- численно решать кинетическое уравнение;
- использовать различные потенциалы межмолекулярного взаимодействия;
- задавать граничные условия для различных типов задач.

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 Больцмана.	1	1		7
2	Консервативный проекционный метод.	1	1		7
3	Многомерные кубатурные сетки Коробова и их преимущество.	1	1		7
4	Обобщение метода для смеси газов	2	1		7
5	Проекционный метод вычисления интеграла столкновений с учётом поступательно-вращательного и поступательно-колебательного переноса энергии.	2	2		7
6	Консервативные конечно-разностные схемы.	2	3		11
7	Дискретная реализация начальных и граничных условий.	2	3		11
8	Аппроксимация уравнения Больцмана на пространственно-скоростной сетке узлов.	2	3		14
9	Граничные условия на поверхностях симметрии течения. Консервативная формулировка граничных условий.	2			4
Итого часов		15	15		75
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. Кинетическое уравнение Больцмана.

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. Консервативный проекционный метод.

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. Многомерные кубатурные сетки Коробова и их преимущество.

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

4. Обобщение метода для смеси газов

Методы решения уравнения диффузии. Метод дискретных ординат для решения уравнения переноса. Метод характеристик для решения уравнения переноса.

5. Проекционный метод вычисления интеграла столкновений с учётом поступательно-вращательного и поступательно-колебательного переноса энергии.

Проекционный метод вычисления интеграла столкновений с учётом поступательно-вращательного и поступательно-колебательного переноса энергии.

6. Консервативные конечно-разностные схемы.

Методы решения уравнения диффузии. Метод дискретных ординат для решения уравнения переноса. Метод характеристик для решения уравнения переноса.

7. Дискретная реализация начальных и граничных условий.

Дискретная реализация начальных и граничных условий.

8. Аппроксимация уравнения Больцмана на пространственно-скоростной сетке узлов.

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

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

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 или ноутбуками, объединенными в сеть, доступ к суперкомпьютерам с кластерной архитектурой, инструментами MPI.

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, Избранные труды. В серии «Классики науки». Москва. «Наука», 1984

Дополнительная литература

1. Методы расчета ядерных реакторов [Текст], монография/Г. И. Марчук, -М., Госатомиздат, 1961
2. Теория ядерных реакторов [Текст]/Д. Белл, С. Глесстон, пер. с англ. под ред. В. Н. Артамкина, Nuclear reactor theory, -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)

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)

В процессе самостоятельной работы обучающихся возможно использование таких программных средств, как MPI, генератор сеток GMSH.

На лекционных занятиях используются мультимедийные технологии, включая демонстрацию презентаций. В процессе самостоятельной работы обучающиеся используют следующие прикладные программные коды: генератор сеток GMSH на основе открытого кода.

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.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Суперкомпьютерное моделирование в прикладной физике Физтех-школа природоподобных, плазменных и ядерных технологий им. И.В. Курчатова кафедра моделирования ядерных процессов и технологий
курс:	<u>1</u>
квалификация:	магистр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Экзамен	
Разработчик:	В.Ф. Цибульский, д-р техн. наук, старший научный сотрудник

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
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-2.4 Представляет публично результаты проекта (или отдельных его этапов) в форме отчетов, статей, выступлений на научно-практических конференциях, семинарах и т.п.
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
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
	ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
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-4.2 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
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	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

новые научные результаты	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты
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 «Методы анализа газокинетических процессов на основе уравнения Больцмана» обучающийся должен:

знать:

- принципы и методы кинетической теории Больцмана;
- проекционный метод вычисления интеграла столкновений;
- методы решения уравнения адвекции на сетках различного типа;
- метод Коробова;
- метод расщепления.

уметь:

- численно решать кинетическое уравнение;
- использовать различные потенциалы межмолекулярного взаимодействия;
- задавать граничные условия для различных типов задач.

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

с целью контроля освоения обучающимися учебного материала проводится устный опрос в начале занятия по теме прошлого занятия.

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

Перечень типовых контрольных заданий:

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. Учёт 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. Уравнение адвекции.
2. Граничные условия на поверхности твёрдого тела.

Билет 2.

1. Число Кнудсена и характерные размеры системы.
2. Примеры микро и нано устройств.

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

Экзамен проводится в устной форме по билетам. В каждом билете представлено два вопроса. При проведении экзамена обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Опрос обучающегося не должен превышать одного астрономического часа.