

**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

Рабочая программа дисциплины (модуля)

по дисциплине:	Сеточные методы и технологии для численного решения кинетического уравнения
по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Суперкомпьютерное моделирование ядерных процессов и технологий Физтех-школа природоподобных, плазменных и ядерных технологий им. И.В. Курчатова кафедра моделирования ядерных процессов и технологий
курс:	4
квалификация:	бакалавр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

7 (осенний) - Дифференцированный зачет

8 (весенний) - 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

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

Программа обсуждена на заседании кафедры моделирования ядерных процессов и технологий 18.05.2020

Аннотация

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, 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 применения численных методов для уравнений математической физики. Для формирования умения применять теоретические знания на практике студенту необходимо разработка программ и алгоритмов численного решения уравнения Больцмана.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

- изложение основ вычислительных методов для решения кинетического уравнения Больцмана;
- введение в сеточные методы, описание схем первого и второго порядка;
- изложение разностных схем, сходимости, устойчивости, погрешности аппроксимации, теоремы Куранта, спектрального признака;
- изложение явной четырехточечной схемы, неявной шеститочечной схемы, консервативных схем.

Задачи дисциплины

- формирование базовых знаний в области вычислительных методов для решения задач математической физики;
- 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
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-2.2 Знает и умеет применять численные математические методы и прикладное программное обеспечение для решения научных задач в профессиональной области
ОПК-5 Способен участвовать в проведении фундаментальных и прикладных исследований и разработок, самостоятельно осваивать новые теоретические, в том числе, математические методы исследований, и работать на современной экспериментальной научно-исследовательской, измерительно-аналитической и технологической аппаратуре	ОПК-5.1 Способен решать поставленные задачи в области теоретических и экспериментальных исследований и разработок

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-1.4 Умеет строить математические модели для описания и исследования процессов и явлений в соответствующих научных областях
	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

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 излучений 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	Лаб. работы	Самост. работа
1	Аппроксимация дифференциальной задачи в частных производных.	5	5		5
2	Кинетическое уравнение в случае действия внешних сил.	5	5		5
3	Консервативные схемы.	5	5		5
4	Паразитические осцилляции. Понятие монотонности схемы.	4	4		8
5	Программная система генерации сеток GMSH.	4	4		8
6	Разностные схемы второго порядка точности.	4	4		7
7	Сетки. Сеточные функции.	3	3		7
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: 7 (Осенний)

1. Аппроксимация дифференциальной задачи в частных производных.

Уравнение переноса. Разностные схемы. Сходимость. Устойчивость. Теорема Куранта. Спектральный признак. Численное решение уравнение переноса для гладких и разрывных начальных условий с помощью явных и неявных схем первого порядка точности.

2. Кинетическое уравнение в случае действия внешних сил.

Расщепление сложного уравнения. Проблема граничных условий в скоростном пространстве. Случай пространственной симметрии. Решение кинетического уравнения в поле тяжести.

3. Консервативные схемы.

Проблема граничных точек для TVD-схем. Функция распределения. Кинетическое уравнение Больцмана в отсутствии столкновений. Диффузное отражение. Решение одномерного уравнения Больцмана в отсутствии столкновений с граничным условием диффузного отражения (задача о термосе).

Семестр: 8 (Весенний)

4. Паразитические осцилляции. Понятие монотонности схемы.

Теоремы Годунова. Полная вариация. TVD-схемы. Теоремы Хартена. Примеры ограничителей. Практический вид TVD-схем. Численное решение уравнение переноса для гладких и разрывных начальных условий с помощью TVD-схем построенных на основе minmod limiter, MC-limiter и van Leer limiter.

5. Программная система генерации сеток GMSH.

Система генерации сеток GMSH. Примеры.

6. Разностные схемы второго порядка точности.

Явная четырехточечная схема. Искусственная вязкость. Неявная шеститочечная схема. Метод прогонки. Трехслойная разностная схема. Численное решение уравнение переноса для гладких и разрывных начальных условий с помощью явных и неявных схем второго порядка точности.

7. Сетки. Сеточные функции.

Разностная аппроксимация дифференциальных операторов. Погрешность аппроксимации. Решение ОДУ первого порядка.

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. Разностные методы решения задач газовой динамики [Текст] : уч. пособие для вузов : доп. Гос. ком. СССР / А. А. Самарский, Ю. П. Попов .— 5-е изд. — М. : Кн. дом "ЛИБРОКОМ", 2009 .— 424 с.
2. Введение в вычислительную физику [Текст] : [учеб. пособие для вузов] / Р. П. Федоренко ; под ред. А. И. Лобанова .— 2-е изд., испр. и доп. — Долгопрудный : Интеллект, 2008 .— 504 с.
3. Лабораторный практикум по курсу основы вычислительной математики [Текст] : учеб. пособие для вузов .— 2-е изд., испр. и доп. — М. : МЗ Пресс, 2003 .— 193 с.
4. Randall J. Leveque. Finite volume methods for hyperbolic problems. - Cambridge University Press, 2002
5. М.Н. Коган. Динамика разреженного газа. Москва. Изд. "Наука" 1967 г.

Дополнительная литература

1. Г.И.Марчук, Методы расчета ядерных реакторов, - М.:1961г.
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://www.geuz.org/gmsh/>

<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)

Студенты, изучающие курс «Сеточные методы и технологии для численного решения кинетического уравнения» 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 теплопереноса, 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 применения численных методов для уравнений математической физики. Для формирования умения применять теоретические знания на практике студенту необходимо 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)

по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Суперкомпьютерное моделирование ядерных процессов и технологий Физтех-школа природоподобных, плазменных и ядерных технологий им. И.В. Курчатова кафедра моделирования ядерных процессов и технологий
курс:	<u>4</u>
квалификация:	бакалавр
Семестры, формы промежуточной аттестации:	
7 (осенний) - Дифференцированный зачет	
8 (весенний) - Экзамен	
Разработчик:	Ф.Г. Черемисин, д-р физ.-мат. наук, профессор

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
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-2.2 Знает и умеет применять численные математические методы и прикладное программное обеспечение для решения научных задач в профессиональной области
ОПК-5 Способен участвовать в проведении фундаментальных и прикладных исследований и разработок, самостоятельно осваивать новые теоретические, в том числе, математические методы исследований, и работать на современной экспериментальной научно-исследовательской, измерительно-аналитической и технологической аппаратуре	ОПК-5.1 Способен решать поставленные задачи в области теоретических и экспериментальных исследований и разработок
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-1.4 Умеет строить математические модели для описания и исследования процессов и явлений в соответствующих научных областях
	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

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Сеточные методы и технологии для численного решения кинетического уравнения» обучающийся должен:

знать:

- принципы и методы кинетической теории Больцмана, получения когерентного излучения, физические явления, лежащие в основе методов переноса газов излучений 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

Контрольные вопросы для сдачи дифференцированного зачёта в 7-ом семестре:

1. Сетки.
2. Сеточные функции.
3. Решение ОДУ первого порядка.
4. Аппроксимация дифференциальной задачи в частных производных.
5. Уравнение переноса.
6. Разностные схемы. Сходимость. Устойчивость. Теорема Куранта.
7. Спектральный признак.
8. Разностные схемы второго порядка точности. Явная четырехточечная схема.

Контрольные вопросы для сдачи экзамена в 8-ом семестре:

1. Искусственная вязкость. Неявная шеститочечная схема.
2. Метод прогонки. Трехслойная разностная схема.
3. Численное решение уравнение переноса для гладких и разрывных начальных условий.
4. Паразитические осцилляции. Понятие монотонности схемы.
5. Теоремы Годунова. Полная вариация.
6. TVD-схемы. Теоремы Хартена. Примеры ограничителей.
7. Консервативные схемы.
8. Проблема граничных точек для TVD-схем.
9. Кинетическое уравнение в случае действия внешних сил.
10. Расщепление сложного уравнения.
11. Проблема граничных условий в скоростном пространстве.
12. Программная система генерации сеток GMSH.

Примеры экзаменационных билетов в 8-ом семестре:

Билет 1.

Искусственная вязкость. Неявная шеститочечная схема.

Билет 2.

Метод прогонки. Трехслойная разностная схема.

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 не должен превышать одного астрономического часа. Оценивание знаний производится в соответствии с вышеуказанными критериями в соответствии с содержанием дисциплины.