

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

**Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования "Пермский
государственный национальный исследовательский
университет"**

Кафедра теоретической физики

Авторы-составители: **Марышев Борис Сергеевич**
Демин Виталий Анатольевич

Рабочая программа дисциплины
ТЕОРИЯ АНОМАЛЬНОЙ ДИФФУЗИИ
Код УМК 85286

Утверждено
Протокол №6
от «08» июня 2020 г.

Пермь, 2020

1. Наименование дисциплины

Теория аномальной диффузии

2. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Дисциплина входит в вариативную часть Блока « М.1 » образовательной программы по направлениям подготовки (специальностям):

Направление: **28.04.01** Нанотехнологии и микросистемная техника
направленность Материалы микро- и наносистемной техники

3. Планируемые результаты обучения по дисциплине

В результате освоения дисциплины **Теория аномальной диффузии** у обучающегося должны быть сформированы следующие компетенции:

28.04.01 Нанотехнологии и микросистемная техника (направленность : Материалы микро- и наносистемной техники)

ПК.1 готовность формулировать цели и задачи научных исследований в области нанотехнологии и микросистемной техники, обоснованно выбирать теоретические и экспериментальные методы и средства решения сформулированных задач

Индикаторы

ПК.1.2 Использует основные теоретические и экспериментальные подходы при решении поставленных задач в области нанотехнологии и микросистемной техники

4. Объем и содержание дисциплины

| | |
|---|--|
| Направления подготовки | 28.04.01 Нанотехнологии и микросистемная техника (направленность: Материалы микро- и наносистемной техники) |
| форма обучения | очная |
| №№ триместров, выделенных для изучения дисциплины | 2 |
| Объем дисциплины (з.е.) | 3 |
| Объем дисциплины (ак.час.) | 108 |
| Контактная работа с преподавателем (ак.час.), в том числе: | 36 |
| Проведение лекционных занятий | 24 |
| Проведение практических занятий, семинаров | 0 |
| Проведение лабораторных работ, занятий по иностранному языку | 12 |
| Самостоятельная работа (ак.час.) | 72 |
| Формы текущего контроля | Входное тестирование (1) Итоговое контрольное мероприятие (1) Письменное контрольное мероприятие (2) |
| Формы промежуточной аттестации | Зачет (2 триместр) |

5. Аннотированное описание содержания разделов и тем дисциплины

Теория аномальной диффузии. Первый триместр

Диффузия как асимптотика процесса случайных скачков

Вероятность, распределение вероятности, функция распределения, плотность распределения, моменты, характеристическая функция. Характеристические функции различных распределений: преобразования Фурье и Лапласа. Асимптотическое поведение вероятностных распределений при большом числе испытаний: нормальное распределение и распределение Пуассона. Расчет моментных характеристик различных распределений. Прямые и обратные преобразования Фурье и Лапласа.

Скачкообразный процесс, вывод уравнения диффузии, связь с распределениями Пуассона и Гаусса. Общее решение уравнения диффузии в неограниченной среде.

Классификация дифференциальных уравнений с частными производными

Классификация дифференциальных уравнений с частными производными.

Физические задачи, приводящие к уравнениям в частных производных. Дифференциальные уравнения с частными производными 2 порядка. Характеристическое уравнение. Характеристики. Канонические формы. Классификация уравнений в частных производных второго порядка. Гиперболические, параболические, эллиптические уравнения. Классификация уравнений 2 порядка со многими переменными. Канонические формы линейных уравнений с постоянными коэффициентами.

Характеристики.

Уравнения параболического типа

Задачи, приводящие к уравнениям параболического типа. Краевые задачи. Линейная задача о распространении тепла. Уравнение диффузии. Распространение тепла в пространстве. Постановка краевых задач. Принцип максимального значения. Теорема единственности. Теорема единственности для бесконечной прямой.

Метод разделения переменных. Однородная краевая задача. Функция источника. Краевые задачи с разрывными начальными условиями. Неоднородное уравнение теплопроводности. Общая первая краевая задача. Решение простейших краевых задач для однородного уравнения диффузии. Метод разделения переменных. Решение простейших краевых задач для однородного уравнения диффузии в одномерном и двумерном случаях. Функция Бесселя.

Задачи на бесконечной прямой. Диффузия на бесконечной прямой. Функция источника для неограниченной области. Краевые задачи для полуограниченной прямой. Задачи без начальных условий. Решение простейших краевых задач для неоднородного уравнения диффузии. Метод вариации произвольной постоянной. Температурные и концентрационные волны.

Неоднородные уравнения параболического типа. Задачи приводящие к неоднородным уравнениям. Метод решения. Температурные и концентрационные волны.

Поверхностная диффузия

Диффузия по поверхности. Уравнения поверхностной диффузии. Анизотропия диффузии. Диффузиофорез. Неоднородные уравнения поверхностной диффузии. Кинетика испарения и конденсации. Коэффициент конденсации. Решение задач поверхностной диффузии с учетом испарения и конденсации.

Аномальная диффузия

Уравнение аномальной диффузии. Субдиффузия: вывод уравнений, основные свойства. Супердиффузия: вывод уравнений, основные свойства. Моделирование медленной диффузии. Моделирование процессов переноса с помощью уравнений аномальной диффузии. Эффекты памяти при субдиффузии: диффузия с учетом иммобилизации. Описание диффузии с иммобилизацией в рамках двухфазного подхода. Двухфазная модель с линейной кинетикой иммобилизации. Моделирование быстрой диффузии. Фрактальные множества. Супердиффузия во фрактальной среде Обобщенное уравнение Фоккера-Планка. Функциональные уравнения. Простейшие краевые задачи. Решение простейших краевых задач для одномерных уравнений субдиффузии и супердиффузии.

6. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины

Освоение дисциплины требует систематического изучения всех тем в той последовательности, в какой они указаны в рабочей программе.

Основными видами учебной работы являются аудиторские занятия. Их цель - расширить базовые знания обучающихся по осваиваемой дисциплине и систему теоретических ориентиров для последующего более глубокого освоения программного материала в ходе самостоятельной работы. Обучающемуся важно помнить, что контактная работа с преподавателем эффективно помогает ему овладеть программным материалом благодаря расстановке необходимых акцентов и удержанию внимания интонационными модуляциями голоса, а также подключением аудио-визуального механизма восприятия информации.

Самостоятельная работа преследует следующие цели:

- закрепление и совершенствование теоретических знаний, полученных на лекционных занятиях;
- формирование навыков подготовки текстовой составляющей информации учебного и научного назначения для размещения в различных информационных системах;
- совершенствование навыков поиска научных публикаций и образовательных ресурсов, размещенных в сети Интернет;
- самоконтроль освоения программного материала.

Обучающемуся необходимо помнить, что результаты самостоятельной работы контролируются преподавателем во время проведения мероприятий текущего контроля и учитываются при промежуточной аттестации.

Обучающимся с ОВЗ и инвалидов предоставляется возможность выбора форм проведения мероприятий текущего контроля, альтернативных формам, предусмотренным рабочей программой дисциплины. Предусматривается возможность увеличения в пределах 1 академического часа времени, отводимого на выполнение контрольных мероприятий.

Процедура оценивания результатов обучения инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья по дисциплине предусматривает предоставление информации в формах, адаптированных к ограничениям их здоровья и восприятия информации.

При проведении текущего контроля применяются оценочные средства, обеспечивающие передачу информации, от обучающегося к преподавателю, с учетом психофизиологических особенностей здоровья обучающихся.

7. Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы обучающихся по дисциплине

При самостоятельной работе обучающимся следует использовать:

- конспекты лекций;
- литературу из перечня основной и дополнительной учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины (модуля);
- текст лекций на электронных носителях;
- ресурсы информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимые для освоения дисциплины;
- лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение из перечня информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине;
- методические указания для обучающихся по освоению дисциплины.

8. Перечень основной и дополнительной учебной литературы

Основная:

1. Гриняев Ю. В. Методы математической физики: Учебное пособие / Гриняев Ю. В. - Томск: Эль Контент, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2012, ISBN 978-5-4332-0055-5.-148. <http://www.iprbookshop.ru/13862>
2. Методы решения задач тепломассопереноса. Теплопроводность и диффузия в неподвижной среде : учебное пособие / В. И. Коновалов, А. Н. Пахомов, Н. Ц. Гатапова, А. Н. Колиух. — Тамбов : Тамбовский государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2012. — 81 с. — ISBN 2227-8397. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. <http://www.iprbookshop.ru/64112.html>
3. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики: учебное пособие для университетов / А. Н. Тихонов, А. А. Самарский. - Москва: Наука, 1966. - 724.

Дополнительная:

1. Алабужев А. А. Методы математической физики. учебно-методическое пособие Ч. 1. Специальные функции. Цилиндрические функции / А. А. Алабужев, Т. С. Белозерова, В. К. Хеннер ; Федеральное агентство по образованию, Пермский государственный университет. - Пермь, 2007, ISBN 5-7944-0787-5.-127. - Библиогр.: с. 112
2. Белозерова Т. С. Уравнения математической физики. учебное пособие по курсу "Уравнения математической физики" Ч. 1. Волновые уравнения: методы и пакет программ / Т. С. Белозерова, В. К. Хеннер. - Пермь, 2003, ISBN 5-7944-0351-9.-96
3. Бокштейн Б. С., Ярославцев А. Б. Диффузия атомов и ионов в твердых телах / Б. С. Бокштейн, А. Б. Ярославцев. - М.: Мисис, 2005, ISBN 5-87623-130-4.-362.

9. Перечень ресурсов сети Интернет, необходимых для освоения дисциплины

<http://library.psu.ru/node/738> Ресурсы Научной библиотеки ПГНИУ

10. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине

Образовательный процесс по дисциплине **Теория аномальной диффузии** предполагает использование следующего программного обеспечения и информационных справочных систем: Электронные мультимедийные библиотеки и учебные пособия, в том числе предоставляемые научной библиотекой ПГНИУ и цифровой библиотекой ПГНИУ "ELiS":

- материалы базы ЭБС IPRbooks;
- материалы цифровой библиотеки «Библиотех»;
- Электронно-библиотечная система издательства «Лань».

Дополнительный перечень используемых информационных технологий определяется преподавателями дисциплины.

При освоении материала и выполнении заданий по дисциплине рекомендуется использование материалов, размещенных в Личных кабинетах обучающихся ЕТИС ПГНИУ (student.psu.ru).

При организации дистанционной работы и проведении занятий в режиме онлайн могут использоваться:

- система видеоконференцсвязи на основе платформы BigBlueButton (<https://bigbluebutton.org/>).
- система LMS Moodle (<http://e-learn.psu.ru/>), которая поддерживает возможность использования текстовых материалов и презентаций, аудио- и видеоконтент, а так же тесты, проверяемые задания, задания для совместной работы.
- система тестирования Indigo (<https://indigotech.ru/>).

11. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине

Для лекционных занятий требуется аудитория, оснащенная презентационной техникой (проектор, экран, компьютер/ноутбук) с соответствующим программным обеспечением, меловой (и) или маркерной доской.

Для проведения лабораторных работ - компьютерный класс, оснащенный презентационной техникой (проектор, экран, компьютер/ноутбук) и компьютерной техникой с соответствующим программным обеспечением, меловой (и) или маркерной доской.

Для проведения групповых и индивидуальных консультаций - аудитория, оснащенная презентационной техникой (проектор, экран, компьютер/ноутбук) с соответствующим программным обеспечением, меловой (и) или маркерной доской.

Для проведения текущего контроля - аудитория, оснащенная меловой (и) или маркерной доской.

Для самостоятельной работы студентов требуется аудитория, оснащенная компьютерной техникой с возможностью подключения к сети «Интернет», с обеспеченным доступом в электронную информационно-образовательную среду университета, помещения Научной библиотеки ПГНИУ

Помещения научной библиотеки ПГНИУ для обеспечения самостоятельной работы обучающихся:

1. Научно-библиографический отдел, корп.1, ауд. 142. Оборудован 3 персональными компьютерами с доступом к локальной и глобальной компьютерным сетям.

2. Читальный зал гуманитарной литературы, корп. 2, ауд. 418. Оборудован 7 персональными компьютерами с доступом к локальной и глобальной компьютерным сетям.

3. Читальный зал естественной литературы, корп.6, ауд. 107а. Оборудован 5 персональными компьютерами с доступом к локальной и глобальной компьютерным сетям.

4. Отдел иностранной литературы, корп.2 ауд. 207. Оборудован 1 персональным компьютером с доступом к локальной и глобальной компьютерным сетям.

5. Библиотека юридического факультета, корп.9, ауд. 4. Оборудована 11 персональными компьютерами с доступом к локальной и глобальной компьютерным сетям.

6. Читальный зал географического факультета, корп.8, ауд. 419. Оборудован 6 персональными компьютерами с доступом к локальной и глобальной компьютерным сетям.

Все компьютеры, установленные в помещениях научной библиотеки, оснащены следующим программным обеспечением:

Операционная система ALT Linux;

Офисный пакет Libreoffice.

Справочно-правовая система «КонсультантПлюс»

**Фонды оценочных средств для аттестации по дисциплине
Теория аномальной диффузии**

**Планируемые результаты обучения по дисциплине для формирования компетенции.
Индикаторы и критерии их оценивания**

ПК.1

готовность формулировать цели и задачи научных исследований в области нанотехнологии и микросистемной техники, обоснованно выбирать теоретические и экспериментальные методы и средства решения сформулированных задач

| Индикатор | Планируемые результаты обучения | Критерии оценивания результатов обучения |
|---|--|---|
| <p>ПК.1.2 Использует основные теоретические и экспериментальные подходы при решении поставленных задач в области нанотехнологии и микросистемной техники</p> | <p>Знать основные понятия математической статистики, основные законы диффузии, классификацию уравнений в частных производных, поверхностной диффузии, уравнения аномальной диффузии. Уметь находить статистические характеристики случайных процессов, решать уравнения в частных производных, анализировать анизотропную диффузию, неоднородные уравнения поверхностной диффузии, описывать субдиффузию и супердиффузию. Владеть навыками анализа случайных процессов, кинетических задач испарения и конденсации, решения уравнений Фоккера-Планка</p> | <p align="center">Неудовлетворител</p> <p>Не знает основные понятия математической статистики, основные законы диффузии, классификацию уравнений в частных производных, поверхностной диффузии, уравнения аномальной диффузии. Не умеет находить статистические характеристики случайных процессов, решать уравнения в частных производных, анализировать анизотропную диффузию, неоднородные уравнения поверхностной диффузии, описывать субдиффузию и супердиффузию. Не владеет навыками анализа случайных процессов, кинетических задач испарения и конденсации, решения уравнений Фоккера-Планка.</p> <p align="center">Удовлетворительн</p> <p>Общие, но не структурированные знания основных понятий математической статистики, основных законов диффузии, классификации уравнений в частных производных, поверхностной диффузии, уравнения аномальной диффузии. Демонстрирует частично сформированное умение находить статистические характеристики случайных процессов, решать уравнения в частных производных, анализировать анизотропную диффузию, неоднородные уравнения поверхностной диффузии, описывать субдиффузию и супердиффузию. Имеет представление о приёмах анализа случайных процессов, кинетических задач испарения и конденсации, решения уравнений Фоккера-Планка.</p> |

| Индикатор | Планируемые результаты обучения | Критерии оценивания результатов обучения |
|-----------|---------------------------------|--|
| | | <p style="text-align: center;">Хорошо</p> <p>Сформированные, но содержащие отдельные пробелы знания основных понятий математической статистики, основных законов диффузии, классификации уравнений в частных производных, поверхностной диффузии, уравнения аномальной диффузии. В целом успешные, но содержащие отдельные пробелы умения находить статистические характеристики случайных процессов, решать уравнения в частных производных, анализировать анизотропную диффузию, неоднородные уравнения поверхностной диффузии, описывать субдиффузию и супердиффузию. В целом успешно, но с отдельными пробелами владеет навыками анализа случайных процессов, кинетических задач испарения и конденсации, решения уравнений Фоккера-Планка.</p> <p style="text-align: center;">Отлично</p> <p>Сформированные систематические знания основных понятий математической статистики, основных законов диффузии, классификации уравнений в частных производных, поверхностной диффузии, уравнения аномальной диффузии. Сформированное умение находить статистические характеристики случайных процессов, решать уравнения в частных производных, анализировать анизотропную диффузию, неоднородные уравнения поверхностной диффузии, описывать субдиффузию и супердиффузию. Успешное и систематическое применение навыков анализа случайных процессов, кинетических задач испарения и конденсации, решения уравнений Фоккера-Планка.</p> |

Оценочные средства текущего контроля и промежуточной аттестации

Схема доставки : Базовая

Вид мероприятия промежуточной аттестации : Зачет

Способ проведения мероприятия промежуточной аттестации : Оценка по дисциплине в рамках промежуточной аттестации определяется на основе баллов, набранных обучающимся на контрольных мероприятиях, проводимых в течение учебного периода.

Максимальное количество баллов : 100

Конвертация баллов в отметки

«отлично» - от 81 до 100

«хорошо» - от 61 до 80

«удовлетворительно» - от 43 до 60

«неудовлетворительно» / «незачтено» менее 43 балла

| Компетенция (индикатор) | Мероприятие текущего контроля | Контролируемые элементы результатов обучения |
|---|--|--|
| Входной контроль | Диффузия как асимптотика процесса случайных скачков Входное тестирование | |
| ПК.1.2 Использует основные теоретические и экспериментальные подходы при решении поставленных задач в области нанотехнологии и микросистемной техники | Уравнения параболического типа Письменное контрольное мероприятие | Владение основными понятиями математической статистики, знание законов диффузии, классификации уравнений в частных производных |
| ПК.1.2 Использует основные теоретические и экспериментальные подходы при решении поставленных задач в области нанотехнологии и микросистемной техники | Поверхностная диффузия Письменное контрольное мероприятие | Умение строить модели и исследовать задачи поверхностной диффузии. |
| ПК.1.2 Использует основные теоретические и экспериментальные подходы при решении поставленных задач в области нанотехнологии и микросистемной техники | Аномальная диффузия Итоговое контрольное мероприятие | Знание моделей и методов описания аномальной диффузии, кинетических уравнений. |

Спецификация мероприятий текущего контроля

Диффузия как асимптотика процесса случайных скачков

Продолжительность проведения мероприятия промежуточной аттестации: **1 часа**
 Условия проведения мероприятия: **в часы самостоятельной работы**
 Максимальный балл, выставляемый за мероприятие промежуточной аттестации: **0**
 Проходной балл: **0**

| Показатели оценивания | Баллы |
|---|-------|
| Умеет решать однородные и неоднородные линейные обыкновенные дифференциальные уравнения | 14 |
| Умеет решать задачи на основные вероятностные распределения (гипергеометрическое распределение, биномиальное распределение, нормальное распределение, экспоненциальное распределение) | 12 |
| Знает понятия вероятность, функция распределения, характеристическая функция распределения | 12 |

Уравнения параболического типа

Продолжительность проведения мероприятия промежуточной аттестации: **1 часа**
 Условия проведения мероприятия: **в часы аудиторной работы**
 Максимальный балл, выставляемый за мероприятие промежуточной аттестации: **30**
 Проходной балл: **13**

| Показатели оценивания | Баллы |
|---|-------|
| Владение методом разделения переменных. | 8 |
| Владение методами построения математических моделей диффузии и теплопередачи. | 8 |
| Знание классификации дифференциальных уравнений в частных производных. | 7 |
| Владение методами теории вероятностей и математической статистики, умение вычислять свойства случайных величин и распределений. | 7 |

Поверхностная диффузия

Продолжительность проведения мероприятия промежуточной аттестации: **1 часа**
 Условия проведения мероприятия: **в часы аудиторной работы**
 Максимальный балл, выставляемый за мероприятие промежуточной аттестации: **30**
 Проходной балл: **13**

| Показатели оценивания | Баллы |
|---|-------|
| Знание кинетических моделей испарения и конденсации | 8 |
| Умение решать задачи поверхностной диффузии с учётом испарения и конденсации. | 8 |
| Умение исследовать задачи поверхностной диффузии. | 7 |
| Знание особенностей диффузии в анизотропной системе | 7 |

Аномальная диффузия

Продолжительность проведения мероприятия промежуточной аттестации: **1 часа**
 Условия проведения мероприятия: **в часы аудиторной работы**
 Максимальный балл, выставляемый за мероприятие промежуточной аттестации: **40**
 Проходной балл: **17**

| Показатели оценивания | Баллы |
|-----------------------|-------|
|-----------------------|-------|

| | |
|--|----|
| | |
| Владение методами описания субдиффузии и супердиффузии. | 10 |
| Умение описывать иммобилизацию примесей в различных подходах. | 10 |
| Знание уравнения аномальной диффузии. | 10 |
| Владение приемами построения и решения уравнений Фоккера-Планка. | 10 |