

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ  
КАФЕДРА ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ ЯДЕРНЫХ  
РЕАКТОРОВ

ОДОБРЕНО УМС ИЯФИТ

Протокол № 01/08/24-573.1

от 30.08.2024 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ  
ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ПОЛЕЙ НА ЭВМ

Направление подготовки  
(специальность)

[1] 14.05.01 Ядерные реакторы и материалы

| Семестр | Трудоемкость,<br>кред. | Общий объем<br>курса, час. | Лекции, час. | Практич.<br>занятия, час. | Лаборат. работы,<br>час. | В форме<br>практической<br>подготовки/ В | СРС, час. | КСР, час. | Форма(ы)<br>контроля,<br>экз./зач./КР/КП |
|---------|------------------------|----------------------------|--------------|---------------------------|--------------------------|------------------------------------------|-----------|-----------|------------------------------------------|
| 9       | 4                      | 144                        | 32           | 32                        | 0                        |                                          | 12        | 32        | Э                                        |
| Итого   | 4                      | 144                        | 32           | 32                        | 0                        | 0                                        | 12        | 32        |                                          |

## **АННОТАЦИЯ**

Излагаются основные итерационные схемы решения однородных и неоднородных уравнений переноса нейтронов. Формулируются конечно-разностные аналоги дифференциальных операторов для двух и трехмерных моделей и векторно-матричное представление нейтронных и нуклидных полей. Анализируется сходимость соответствующих итерационных алгоритмов. Приводится вариационная формулировка задач решения уравнений переноса нейтронов, и рассматриваются основные классы вариационных методов – прямые, вариационно-разностные и итерационно-синтетические. Дается обоснование применения различных алгоритмов метода Монте-Карло и численных методов решения спектрального уравнения. Все изложение нацелено на реализацию соответствующих алгоритмов на ЭВМ.

### **1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

Цель дисциплины состоит в том, чтобы подготовить студентов к практическому освоению на ЭВМ численных методов и алгоритмов решения различных форм уравнения переноса нейтронов с тем, чтобы будущий специалист мог свободно ориентироваться при выборе и эксплуатации соответствующих пакетов прикладных программ, а при необходимости, проводить их модернизацию или создавать новые.

Задача дисциплины - изучение основных численных методов и алгоритмов расчета нейтронных и нуклидных полей на ЭВМ.

По завершению изучения дисциплины студенты должны знать принципы построения численных алгоритмов, уметь оценивать области применимости и эффективность их реализации на ЭВМ.

### **2. МЕСТО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВО**

Перечень дисциплин и разделов, усвоение которых необходимо для изучения данной дисциплины.

1. Высшая математика (дифференциальное и интегральное исчисление).
2. Аналитическая геометрия (системы координат, векторы).
3. Линейная алгебра (линейные пространства, операторы).
4. Математический анализ (ряды Тейлора, поверхностные интегралы, градиент, дивергенция).
5. Обыкновенные дифференциальные уравнения.
6. Теория функций комплексного переменного (преобразование Лапласа, Фурье).
7. Уравнения математической физики.
8. Теоретическая физика (кинетическое уравнение Больцмана, распределение газов).
9. Теория переноса нейтронов.

### **3. ФОРМИРУЕМЫЕ КОМПЕТЕНЦИИ И ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ**

Универсальные и(или) общепрофессиональные компетенции:

|                                |                                                      |
|--------------------------------|------------------------------------------------------|
| Код и наименование компетенции | Код и наименование индикатора достижения компетенции |
|--------------------------------|------------------------------------------------------|

Профессиональные компетенции в соответствии с задачами и объектами (областями знаний) профессиональной деятельности:

| Задача профессиональной деятельности (ЗПД)                                                                                    | Объект или область знания                                                                                      | Код и наименование профессиональной компетенции;<br>Основание (профессиональный стандарт-ПС, анализ опыта)                                                                                                 | Код и наименование индикатора достижения профессиональной компетенции                                                                                                                                                                                                                                        |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| проектный                                                                                                                     |                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Проведение исследований новых технических решений для обоснования выбранных параметров конструкций                            | Атомные электрические станции Плавучая АЭС. Научные исследования и проектные работы на ядерных предприятиях    | ПК-1.7 [1] - Способен анализировать и оценивать эффективность систем обеспечения безопасности ядерных материалов<br><br><i>Основание:</i><br>Профессиональный стандарт: 24.078                             | З-ПК-1.7[1] - Знать основные принципы систем учета, контроля и безопасности ;<br>У-ПК-1.7[1] - Уметь анализировать и оценивать эффективность систем учета, контроля и безопасности;<br>В-ПК-1.7[1] - Владеть навыками работы с систем учета, контроля и безопасности                                         |
| Проектирование, создание и внедрение новых продуктов и систем, применение теоретических знаний в реальной инженерной практике | Ядерные материалы, установки и системы обеспечения их безопасности. Атомные электрические станции Плавучая АЭС | ПК-1.8 [1] - Способен проводить расчет, концептуальную и проектную проработку современных систем учета, контроля и защиты ядерных материалов<br><br><i>Основание:</i><br>Профессиональный стандарт: 40.011 | З-ПК-1.8[1] - Знать современные системы учета и контроля ядерных материалов;<br>У-ПК-1.8[1] - Уметь проводить расчет современных систем учета и контроля ядерных материалов ;<br>В-ПК-1.8[1] - Владеть навыками концептуальной и проектной проработки современных систем учета и контроля ядерных материалов |

#### 4. ВОСПИТАТЕЛЬНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ДИСЦИПЛИНЫ

| Направления/цели воспитания | Задачи воспитания (код)                                                                                               | Воспитательный потенциал дисциплин                                                                                               |
|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Профессиональное воспитание | Создание условий, обеспечивающих, формирование ответственности за профессиональный выбор, профессиональное развитие и | Использование воспитательного потенциала дисциплин профессионального модуля для формирования у студентов ответственности за свое |

|                             |                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                             | профессиональные решения (B18)                                                                                                                                                                               | профессиональное развитие посредством выбора студентами индивидуальных образовательных траекторий, организации системы общения между всеми участниками образовательного процесса, в том числе с использованием новых информационных технологий.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Профессиональное воспитание | Создание условий, обеспечивающих, формирование научного мировоззрения, культуры поиска нестандартных научно-технических/практических решений, критического отношения к исследованиям лженаучного толка (B19) | 1.Использование воспитательного потенциала дисциплин/практик «Научно-исследовательская работа», «Проектная практика», «Научный семинар» для:<br>- формирования понимания основных принципов и способов научного познания мира, развития исследовательских качеств студентов посредством их вовлечения в исследовательские проекты по областям научных исследований. 2.Использование воспитательного потенциала дисциплин "История науки и инженерии", "Критическое мышление и основы научной коммуникации", "Введение в специальность", "Научно-исследовательская работа", "Научный семинар" для:<br>- формирования способности отделять настоящие научные исследования от лженаучных посредством проведения со студентами занятий и регулярных бесед;<br>- формирования критического мышления, умения рассматривать различные исследования с экспертной позиции посредством обсуждения со студентами современных исследований, исторических предпосылок появления тех или иных открытий и теорий. |

## 5. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Разделы учебной дисциплины, их объем, сроки изучения и формы контроля:

| № п.п | Наименование раздела учебной дисциплины     | Недели | Лекции/ Практ. (семинары )/ Лабораторные работы, час. | Обязат. текущий контроль (форма*, неделя) | Максимальный балл за раздел** | Аттестация раздела (форма*, неделя) | Индикаторы освоения компетенции                            |
|-------|---------------------------------------------|--------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------------------------------|
|       | <i>9 Семестр</i>                            |        |                                                       |                                           |                               |                                     |                                                            |
| 1     | Раздел 1                                    | 1-8    | 16/16/0                                               |                                           | 25                            | КИ-8                                | 3-ПК-1.7, У-ПК-1.7, В-ПК-1.7, 3-ПК-1.8, У-ПК-1.8, В-ПК-1.8 |
| 2     | Раздел 2                                    | 8-16   | 16/16/0                                               |                                           | 25                            | КИ-16                               | 3-ПК-1.7, У-ПК-1.7, В-ПК-1.7, 3-ПК-1.8, У-ПК-1.8, В-ПК-1.8 |
|       | <i>Итого за 9 Семестр</i>                   |        | 32/32/0                                               |                                           | 50                            |                                     |                                                            |
|       | <b>Контрольные мероприятия за 9 Семестр</b> |        |                                                       |                                           | 50                            | Э                                   | 3-ПК-1.7, У-ПК-1.7, В-ПК-1.7, 3-ПК-1.8, У-ПК-1.8, В-ПК-1.8 |

\* – сокращенное наименование формы контроля

\*\* – сумма максимальных баллов должна быть равна 100 за семестр, включая зачет и (или) экзамен

Сокращение наименований форм текущего контроля и аттестации разделов:

| Обозначение | Полное наименование |
|-------------|---------------------|
| КИ          | Контроль по итогам  |
| Э           | Экзамен             |

### КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

| Недели     | Темы занятий / Содержание                                                                                                                                                                                                                                                                         | Лек., час.             | Пр./сем., час. | Лаб., час. |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|----------------|------------|
|            | <i>9 Семестр</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 32                     | 32             | 0          |
| <b>1-8</b> | <b>Раздел 1</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 16                     | 16             | 0          |
| 1 - 2      | <b>Метод простых итераций</b><br>Ограниченность ресурсов ЭВМ ближайших поколений и невозможность точного решения уравнения переноса для реальных моделей. Классификация методов численного решения различных форм уравнений переноса нейтронов.<br>Метод простых итераций для решения однородного | Всего аудиторных часов |                |            |
|            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 4                      | 4              | 0          |
|            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Онлайн                 |                |            |
|            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 0                      | 0              | 0          |

|       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                        |   |   |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|---|---|
|       | уравнения. Степенной метод решения неоднородного уравнения. Оценка скорости сходимости степенных методов и распределение собственных чисел для простейших моделей. Процесс ортогонализации Шмидта и организация итераций при определении высших гармоник однородного уравнения и в частном случае неоднородного уравнения.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                        |   |   |
| 3 - 4 | <b>Принципы построения и структура конечно-разностных операторов 2-х и 3-х мерного уравнения диффузии. Общий подход к анализу сходимости итерационных методов</b><br>Виды конечно-разностных сеток в прямоугольной и гексагональной геометриях. Переход к системе алгебраических уравнений. Особенности реализации граничных условий. Структура и спектральные свойства соответствующих матриц. Метод матричной прогонки. Различные определения векторных и матричных норм. Необходимое условие сходимости итерационного процесса. Связь со степенным методом . Модифицированный итерационный процесс и простейшее ускорение сходимости. Подобное преобразование операторов векторно-матричного представления уравнения диффузии.                                                        | Всего аудиторных часов |   |   |
|       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 4                      | 4 | 0 |
|       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Онлайн                 |   |   |
|       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 0                      | 0 | 0 |
| 5 - 6 | <b>Методы переменных направлений и верхней релаксации</b><br>Принципиальная схема метода переменных направлений. Математическая формулировка метода переменных направлений. Выбор ускоряющих параметров. Оценка скорости сходимости. Расчетные формулы метода переменных направлений и оценка числа операций. Сравнение с методом матричной факторизации. Численные и аналитические оценки спектральных границ. Формулировка метода простых итераций. Доказательство сходимости. Графическая интерпретация основной идеи релаксационных методов и математическая формулировка метода верхней релаксации.                                                                                                                                                                                 | Всего аудиторных часов |   |   |
|       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 4                      | 4 | 0 |
|       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Онлайн                 |   |   |
|       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 0                      | 0 | 0 |
| 7 - 8 | <b>Константное обеспечение нейтронно-физических расчетов и векторно-матричное представление нейтронных и нуклидных полей.</b><br>Структурная схема построения библиотеки микроконстант на основе файлов Типы представления данных и форматы библиотек ENDF/B. Формализм факторов резонансной самоэкранировки сечений и структура библиотеки БНАБ. Подгрупповое представление сечений. Алгоритмы расчета макроконстант на основе подгрупповых параметров. Комплекс программ NJOY для обработки файлов ENDF/B. Векторно-матричное представление системы многогрупповых уравнений переноса нейтронов. Взаимодействие нейтронных и нуклидных полей. Векторно-матричная запись уравнений нуклидного поля. Численные и аналитические методы решения задач выгорания и воспроизводства топлива. | Всего аудиторных часов |   |   |
|       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 4                      | 4 | 0 |
|       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Онлайн                 |   |   |
|       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 0                      | 0 | 0 |

|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                        |    |   |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|----|---|
| 8-16    | <b>Раздел 2</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 16                     | 16 | 0 |
| 9 - 10  | <b>Вариационная формулировка задач решения уравнений переноса. Прямые вариационные методы в операторной форме</b><br>Общая постановка вариационной задачи. Основные определения. Лагранжиан, вариация функции и первая вариационная производная. Техника варьирования. Основные формулы. Примеры первых вариаций линейных, билинейных и дробно билинейных лагранжианов. Простейшие приемы конструирования лагранжианов для однородного и неоднородного уравнений в операторной форме. Функционал энергии для самосопряженных операторов. Функционал среднеквадратичного отклонения. Представление решения и выбор координатных функций. Формулировка уравнений методов Ритца, Галеркина и Петрова-Галеркина.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Всего аудиторных часов |    |   |
|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 4                      | 4  | 0 |
|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Онлайн                 |    |   |
|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 0                      | 0  | 0 |
| 11 - 12 | <b>Вариационно-разностные методы решения и методы конечных (МКЭ) и граничных (МГЭ) элементов решения двумерного уравнения диффузии</b><br>Понятие о главных и естественных условиях непрерывности решения и условий на внешних границах. Примеры лагранжианов с естественными граничными условиями и условиями непрерывности тока нейтронов. Простейший вид пробных функций и формулировка уравнений вариационно-разностного метода. Представление решений в МКЭ. Интерполяция по Лагранжу и вывод формул для компонент вектор-функций для треугольных и прямоугольных элементов. Проблема сохранения непрерывности решений на границах элементов. Вариационная формулировка МКЭ. Введение глобального вектора решения и переход векторно-матричной записи уравнений МКЭ. Представление решения в методе граничных элементов. Примеры уравнений границ и сохранение непрерывности и гладкости решения в МГЭ. Переход к глобальному вектору коэффициентов разложения решения. Вариационная формулировка и векторно-матричная запись уравнений МГЭ. Оценка числа операций и эффективности метода. | Всего аудиторных часов |    |   |
|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 4                      | 4  | 0 |
|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Онлайн                 |    |   |
|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 0                      | 0  | 0 |
| 13 - 14 | <b>Синтетические и итерационно-синтетические методы решения уравнений переноса</b><br>Представление многомерных функций экстремальным рядом Фурье. Вариационная постановка задачи. Получение интегральных уравнений для составляющих решения. Модификация алгоритма и его векторно-матричное представление. Ортогонализация составляющих. Вариационная формулировка синтетических и итерационно-синтетических методов. Различные алгоритмы реализации метода. Оценка эффективности.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Всего аудиторных часов |    |   |
|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 4                      | 4  | 0 |
|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Онлайн                 |    |   |
|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 0                      | 0  | 0 |
| 15 - 16 | <b>Метод Монте-Карло и методы решения спектрального</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Всего аудиторных часов |    |   |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |        |   |   |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|---|---|
| <b>уравнения</b><br>Розыгрывание дискретных и непрерывных случайных величин на ЭВМ. Простейшая задача о прохождении нейтронов через пластину. Розыгрывание столкновений, косинуса угла направления полета нейтронов и пробега нейтрона до столкновения. Метод пакета и метод выравнивания полного сечения. Построение траекторий нейтронов в гетерогенной среде. Локальные оценки потока нейтронов. Предельная теорема теории вероятности и общая схема оценки погрешности в методе Монте-Карло.<br>Интерполяционные и мультигрупповые методы решения спектрального уравнения. Метод условного разделения энергетической и пространственно-угловых переменных как основа перехода к многозонной спектральной задаче. Балансный метод и рекурсивный алгоритм расчета интеграла столкновений. | 4      | 4 | 0 |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Онлайн |   |   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 0      | 0 | 0 |

Сокращенные наименования онлайн опций:

| Обозначение | Полное наименование              |
|-------------|----------------------------------|
| ЭК          | Электронный курс                 |
| ПМ          | Полнотекстовый материал          |
| ПЛ          | Полнотекстовые лекции            |
| ВМ          | Видео-материалы                  |
| АМ          | Аудио-материалы                  |
| Прз         | Презентации                      |
| Т           | Тесты                            |
| ЭСМ         | Электронные справочные материалы |
| ИС          | Интерактивный сайт               |

## ТЕМЫ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

| Недели | Темы занятий / Содержание                                                                                                                                                                                                                         |
|--------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|        | <i>9 Семестр</i>                                                                                                                                                                                                                                  |
| 1 - 2  | <b>Степенной метод 1</b><br>Степенной метод решения однородного уравнения для поиска собственной функции, соответствующей максимальному по модулю собственному числу и его модификация для поиска высших гармоник. Анализ сходимости.             |
| 3 - 4  | <b>Степенной метод 2</b><br>Степенной метод решения неоднородного уравнения и его модификация. Анализ сходимости и реализация простейшего метода ускорения сходимости.                                                                            |
| 5 - 6  | <b>Двумерное уравнение диффузии</b><br>Расчет коэффициентов и построение матрицы векторно-матричного аналога двумерного уравнения диффузии. Сравнение численного и аналитического решений.                                                        |
| 7 - 8  | <b>Метод переменных направлений</b><br>Реализация и анализ сходимости метода переменных направлений. Сравнение численного и аналитического оценок норм операторов. Исследование влияния погрешности ускоряющих параметров на скорость сходимости. |
| 9 - 10 | <b>Метод верхней релаксации</b><br>Реализация и анализ сходимости метода верхней релаксации. Сравнение с методом                                                                                                                                  |

|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|---------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|         | матричной прогонки.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| 11 - 14 | <b>Метод Монте Карло</b><br>Метод Монте-Карло, реализация простейшей задачи, модификации алгоритмов. Зависимость погрешности вычислений от числа историй и нейтронно-физических характеристик среды.                                                                                                                               |
| 15 - 16 | <b>Метод дискретных ординат</b><br>Метод дискретных координат. Реализация алгоритма метода в одномерной плоской геометрии. Организация итераций по интегралу рассеяния. Критерии окончания итераций. Организация итераций в задачах на собственные значения. Исследование сходимости. Сравнение результатов с методом Монте-Карло. |

## 6. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Лекции, практические занятия, самостоятельная работа студентов.

## 7. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

Фонд оценочных средств по дисциплине обеспечивает проверку освоения планируемых результатов обучения (компетенций и их индикаторов) посредством мероприятий текущего, рубежного и промежуточного контроля по дисциплине.

Связь между формируемыми компетенциями и формами контроля их освоения представлена в следующей таблице:

| Компетенция | Индикаторы освоения | Аттестационное мероприятие (КП 1) |
|-------------|---------------------|-----------------------------------|
| ПК-1.7      | З-ПК-1.7            | Э, КИ-8, КИ-16                    |
|             | У-ПК-1.7            | Э, КИ-8, КИ-16                    |
|             | В-ПК-1.7            | Э, КИ-8, КИ-16                    |
| ПК-1.8      | З-ПК-1.8            | Э, КИ-8, КИ-16                    |
|             | У-ПК-1.8            | Э, КИ-8, КИ-16                    |
|             | В-ПК-1.8            | Э, КИ-8, КИ-16                    |

## Шкалы оценки образовательных достижений

Шкала каждого контрольного мероприятия лежит в пределах от 0 до установленного максимального балла включительно. Итоговая аттестация по дисциплине оценивается по 100-балльной шкале и представляет собой сумму баллов, заработанных студентом при выполнении заданий в рамках текущего и промежуточного контроля.

Итоговая оценка выставляется в соответствии со следующей шкалой:

| Сумма баллов | Оценка по 4-ех балльной шкале | Оценка ECTS | Требования к уровню освоению учебной дисциплины                                                                                                                                                                                             |
|--------------|-------------------------------|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 90-100       | 5 – «отлично»                 | A           | Оценка «отлично» выставляется студенту, если он глубоко и прочно усвоил программный материал, исчерпывающе, последовательно, четко и логически стройно его излагает, умеет тесно увязывать теорию с практикой, использует в ответе материал |

|         |                           |   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|---------|---------------------------|---|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|         |                           |   | монографической литературы.                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| 85-89   | 4 – «хорошо»              | В | Оценка «хорошо» выставляется студенту, если он твёрдо знает материал, грамотно и по существу излагает его, не допуская существенных неточностей в ответе на вопрос.                                                                                                                                         |
| 75-84   |                           | С |                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 70-74   |                           | Д |                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 65-69   | 3 – «удовлетворительно»   | Е | Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если он имеет знания только основного материала, но не усвоил его деталей, допускает неточности, недостаточно правильные формулировки, нарушения логической последовательности в изложении программного материала.                                        |
| 60-64   |                           |   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Ниже 60 | 2 – «неудовлетворительно» | Ф | Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, который не знает значительной части программного материала, допускает существенные ошибки. Как правило, оценка «неудовлетворительно» ставится студентам, которые не могут продолжить обучение без дополнительных занятий по соответствующей дисциплине. |

## 8. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

### ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. ЭИ К89 Основы теории критичности, методы расчета и возмущение реактивности реактора : учебное пособие для вузов, Кузьмин А.М., Москва: МИФИ, 2008
2. 621.039 К89 Основы теории критичности, методы расчета и возмущение реактивности реактора : учебное пособие для вузов, Кузьмин А.М., Москва: МИФИ, 2008
3. ЭИ С12 Физическая теория ядерных реакторов Ч.1 Однородная размножающая среда и теория гетерогенных структур, Савандер В.И., : МИФИ, 2007
4. 621.039 С12 Физическая теория ядерных реакторов Ч.2 Теория возмущений и медленные нестационарные процессы, Савандер В.И., Москва: НИЯУ МИФИ, 2013

### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. 621.039 С47 Вариационно-разностные методы расчета ядерных реакторов : , Сироткин А.М., Слесарев И.С., М.: Энергоиздат, 1981
2. 539.1 М30 Численные методы в теории переноса нейтронов : , Лебедев В.И., Марчук Г.И., М.: Атомиздат, 1981

3. 517 С40 Численные методы расчета нейтронных полей : Учеб. пособие, Сироткин А.М., М.: МИФИ, 1989

#### ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ:

Специальное программное обеспечение не требуется

#### LMS И ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСЫ:

<https://online.mephi.ru/>

<http://library.mephi.ru/>

### **9. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

Специальное материально-техническое обеспечение не требуется

### **10. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ СТУДЕНТОВ**

Необходимо иметь представление о многообразии используемых в теории реакторов методов расчета и давать основные признаки классификация методов численного решения уравнения переноса нейтронов. Нужно уметь давать обоснование метода простых итераций для решения однородного уравнения, степенного метода решения неоднородного уравнения, оценки скорости сходимости степенных методов и распределения собственных чисел для простейших моделей. Знать процесс ортогонализации Шмидта и организации итераций при определении высших гармоник однородного уравнения и в частном случае неоднородного уравнения. Важно, на практических занятиях реализовать и исследовать сходимость разобранных алгоритмов.

### **11. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ПРЕПОДАВАТЕЛЕЙ**

Следует познакомить студентов с принципами построения и структурой конечно-разностных операторов 2-х и 3-х мерного уравнения диффузии, дать общий подход к анализу сходимости итерационных методов, научить студентов строить конечно-разностные сетки в прямоугольной и гексагональной геометриях. Переходить к системе алгебраических уравнений. Учитывать особенности реализации граничных условий.

Нужно показать студентам отличие принципиальной схемы метода переменных направлений от строгой математической формулировки метода переменных направлений. Необходимо обосновать выбор ускоряющих параметров. Уметь оценивать скорость сходимости и число операций. Сравнить с методом матричной факторизации, формулировать метод простых итераций. Уметь доказывать сходимость метода верхней релаксации.

Особое внимание нужно уделить обоснованию константного обеспечения нейтронно-физических расчетов и векторно-матричному представлению нейтронных и нуклидных полей. В этом разделе нужно дать структурную схему построения библиотеки микроконстант на основе файлов. Типы представления данных и форматы библиотек ENDF/B. Формализм факторов резонансной самоэкранирования сечений и структуру библиотеки БНАБ.

Подгрупповое представление сечений. Алгоритмы расчета макроконстант на основе подгрупповых параметров. Комплекс программ NJOY для обработки файлов ENDF/B.

Студентам необходимо дать вывод векторно-матричного представления системы многогрупповых уравнений переноса нейтронов. Указать на взаимодействие нейтронных и нуклидных полей. Дать вывод векторно-матричной записи уравнений нуклидного поля. Подробно остановиться на численных и аналитических методах решения задач выгорания и воспроизводства топлива.

В разделе «Вариационная формулировка задач решения уравнений переноса» необходимо рассмотреть прямые вариационные методы в операторной форме. Для этого необходимо изложить общую постановку вариационной задачи, основные определения Лагранжиана, вариации функции и первой вариационной производной, технику варьирования, простейшие приемы конструирования лагранжианов для однородного и неоднородного уравнений в операторной форме. Функционал энергии для самосопряженных операторов. Функционал среднеквадратичного отклонения. Представление решения и выбор координатных функций. Формулировку уравнений методов Ритца, Галеркина и Петрова-Галеркина.

Вариационно-разностные методы решения и методы конечных (МКЭ) и граничных (МГЭ) элементов решения двумерного уравнения диффузии должны излагаться на основе понятий главных и естественных условиях непрерывности решения и условий на внешних границах. Необходимо дать примеры лагранжианов с естественными граничными условиями и условиями непрерывности тока нейтронов. Простейший вид пробных функций и формулировка уравнений вариационно-разностного метода.

Представление решений в МКЭ должно быть обосновано интерполяцией по Лагранжу и выводом формул для компонент вектор-функций для треугольных и прямоугольных элементов, как основой сохранения непрерывности решений на границах элементов.

Метод Монте-Карло излагается на основе следующих разделов:

Розыгрывание дискретных и непрерывных случайных величин на ЭВМ. Простейшая задача о прохождении нейтронов через пластину. Розыгрывание столкновений, косинуса угла направления полета нейтронов и пробега нейтрона до столкновения. Метод пакета и метод выравнивания полного сечения. Построение траекторий нейтронов в гетерогенной среде. Локальные оценки потока нейтронов. Особое внимание следует уделить практической реализации метода Монте-Карло в реакторных задачах с процессом итераций по источнику деления.

Автор(ы):

Сироткин Алексей Михайлович, к.ф.-м.н., доцент