

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 ТЕПЛОФИЗИКИ

ОДОБРЕНО УМС ИЯФИТ

Протокол № 01/08/24-573.1

от 30.08.2024 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ

Направление подготовки  
(специальность)

[1] 14.04.01 Ядерная энергетика и теплофизика

| 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 |
|---------|------------------------|----------------------------|--------------|---------------------------|--------------------------|------------------------------------------|-----------|-----------|------------------------------------------|
| 2       | 4                      | 144                        | 15           | 30                        | 15                       |                                          | 48        | 0         | Э                                        |
| Итого   | 4                      | 144                        | 15           | 30                        | 15                       | 0                                        | 48        | 0         |                                          |

## АННОТАЦИЯ

Целями освоения дисциплины «Методы исследования нестационарных тепловых процессов» является ознакомление студентов с вопросами и методами экспериментального и математического моделирования нестационарных тепловых процессов в физико-энергетических установках, обучение студентов умениям применять полученные знания в производственной и научной деятельности, применение компьютерных технологий на базе современных языков программирования и вычислительных комплексов для решения сложных задач теплообмена. Приобретение навыков работы с научной, справочной и электронной литературой.

### 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Целями освоения дисциплины «Методы исследования нестационарных тепловых процессов» является ознакомление студентов с вопросами и методами экспериментального и математического моделирования нестационарных тепловых процессов в физико-энергетических установках, обучение студентов умениям применять полученные знания в производственной и научной деятельности, применение компьютерных технологий на базе современных языков программирования и вычислительных комплексов для решения сложных задач теплообмена. Приобретение навыков работы с научной, справочной и электронной литературой.

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

Дисциплина посвящена подготовке студентов к решению инженерных задач расчета ядерных энергетических установок на основе строгих научных методов. Знания, полученные студентами при изучении различных дисциплин, применяются к решению задач, характерных для расчета ядерных энергетических установок

### 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 |
|--------------------------------------------|---------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| научно-исследовательский                   |                           |                                                                                                            |                                                                       |

|                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| проектирование, создание и эксплуатация атомных станций и других ядерных энергетических установок, вырабатывающих, преобразующих и использующих тепловую и ядерную энергию | ядерные реакторы, термоядерные и энергетические установки, теплогидравлические и нейтронно-физические процессы в активных зонах ядерных реакторов и бланкетов термоядерных реакторов, тепловые измерения и контроль, теплоносители и материалы ядерных реакторов, ядерный топливный цикл, системы обеспечения безопасности ядерных энергетических установок, системы управления ядерно-физическими установками, программные комплексы и математические модели для теоретического и экспериментального исследования явлений и закономерностей в области теплофизики и энергетики, перспективные методы преобразования энергии | ПК-1.1 [1] - Способен рассчитывать и измерять физические характеристики ядерных энергетических установок, проводить гидродинамические и тепловые расчеты в сложных системах<br><br><i>Основание:</i><br>Профессиональный стандарт: 24.028 | З-ПК-1.1[1] - знать методы нейтронно-физических и тепло-гидравлических измерений и расчетов; У-ПК-1.1[1] - уметь выполнять нейтронно-физические и тепло-гидравлические измерения в реакторной установке; В-ПК-1.1[1] - владеть прикладным программным обеспечением |
| проектирование, создание и эксплуатация атомных станций и других ядерных энергетических установок, вырабатывающих, преобразующих и использующих тепловую и ядерную энергию | ядерные реакторы, термоядерные и энергетические установки, теплогидравлические и нейтронно-физические процессы в активных зонах ядерных реакторов и бланкетов термоядерных реакторов, тепловые измерения и контроль, теплоносители и материалы ядерных                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | ПК-8 [1] - способен владеть расчетно-теоретическими и экспериментальными методами исследования физических процессов, выполнять экспериментальные исследования и проводить обработку, анализ и обобщение полученных результатов            | З-ПК-8[1] - знать типовые методики и номенклатуру выполнения измерений и расчетов процессов; ; У-ПК-8[1] - уметь обрабатывать результаты измерений и анализировать результаты расчетов;; В-ПК-8[1] - владеть методами исследования                                 |

|                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                            | реакторов, ядерный топливный цикл, системы обеспечения безопасности ядерных энергетических установок, системы управления ядерно-физическими установками, программные комплексы и математические модели для теоретического и экспериментального исследования явлений и закономерностей в области теплофизики и энергетики, перспективные методы преобразования энергии                                                                                                              | Основание:<br>Профессиональный стандарт: 24.028                                                                                                                                                  | физических процессов                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| производственно-технологический                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| проектирование, создание и эксплуатация атомных станций и других ядерных энергетических установок, вырабатывающих, преобразующих и использующих тепловую и ядерную энергию | ядерные реакторы, термоядерные и энергетические установки, теплогидравлические и нейтронно-физические процессы в активных зонах ядерных реакторов и бланкетов термоядерных реакторов, тепловые измерения и контроль, теплоносители и материалы ядерных реакторов, ядерный топливный цикл, системы обеспечения безопасности ядерных энергетических установок, системы управления ядерно-физическими установками, программные комплексы и математические модели для теоретического и | ПК-1.2 [1] - Способен выбирать обоснованные критерии безопасной работы и оценивать риски при эксплуатации ядерно-энергетических установок<br><br>Основание:<br>Профессиональный стандарт: 24.028 | З-ПК-1.2[1] - знать правила охраны труда и культуру безопасности;<br>У-ПК-1.2[1] - уметь обеспечивать безопасную эксплуатацию систем и оборудования;<br>В-ПК-1.2[1] - владеть методами и приемами безопасного выполнения работ с соблюдением требований охраны труда и инструкций по безопасности |

|                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                               |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                            | экспериментального исследования явлений и закономерностей в области теплофизики и энергетики, перспективные методы преобразования энергии                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                               |
| проектный                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                               |
| проектирование, создание и эксплуатация атомных станций и других ядерных энергетических установок, вырабатывающих, преобразующих и использующих тепловую и ядерную энергию | ядерные реакторы, термоядерные и энергетические установки, теплогидравлические и нейтронно-физические процессы в активных зонах ядерных реакторов и бланкетов термоядерных реакторов, тепловые измерения и контроль, теплоносители и материалы ядерных реакторов, ядерный топливный цикл, системы обеспечения безопасности ядерных энергетических установок, системы управления ядерно-физическими установками, программные комплексы и математические модели для теоретического и экспериментального исследования явлений и закономерностей в области теплофизики и энергетики, перспективные методы преобразования энергии | ПК-4 [1] - способен использовать в разработке технических проектов новые информационные технологии и алгоритмы<br><br><i>Основание:</i><br>Профессиональный стандарт: 24.028 | З-ПК-4[1] - знать основы компьютерных и информационных технологий; ;<br>У-ПК-4[1] - уметь обобщать и анализировать информацию;<br>В-ПК-4[1] - владеть информацией по перспективам развития атомной энергетики |

#### 4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

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

| №<br>п.п | Наименование<br>раздела учебной<br>дисциплины                                 | Недели | Лекции/ Практи.<br>(семинары )/<br>Лабораторные<br>работы, час. | Обязат. текущий<br>контроль (форма*,<br>неделя) | Максимальный<br>балл за раздел** | Аттестация<br>раздела (форма*,<br>неделя) | Индикаторы<br>освоения<br>компетенции                                                                                                       |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------|--------|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|          | <i>2 Семестр</i>                                                              |        |                                                                 |                                                 |                                  |                                           |                                                                                                                                             |
| 1        | Введение.<br>Термодатчики для<br>исследования<br>нестационарных<br>процессов. | 1-8    | 8/15/8                                                          |                                                 | 25                               | СК-8                                      | 3-ПК-1.1,<br>У-ПК-1.1,<br>В-ПК-1.1,<br>3-ПК-1.2,<br>У-ПК-1.2,<br>В-ПК-1.2,<br>3-ПК-4,<br>У-ПК-4,<br>В-ПК-4,<br>3-ПК-8,<br>У-ПК-8,<br>В-ПК-8 |
| 2        | Нестационарные<br>процессы в жидкости.                                        | 9-15   | 7/15/7                                                          |                                                 | 25                               | СК-15                                     | 3-ПК-1.1,<br>У-ПК-1.1,<br>В-ПК-1.1,<br>3-ПК-1.2,<br>У-ПК-1.2,<br>В-ПК-1.2,<br>3-ПК-4,<br>У-ПК-4,<br>В-ПК-4,<br>3-ПК-8,<br>У-ПК-8,<br>В-ПК-8 |
|          | <i>Итого за 2 Семестр</i>                                                     |        | 15/30/15                                                        |                                                 | 50                               |                                           |                                                                                                                                             |
|          | <b>Контрольные<br/>мероприятия за 2<br/>Семестр</b>                           |        |                                                                 |                                                 | 50                               | Э                                         | 3-ПК-1.1,<br>У-ПК-1.1,<br>В-ПК-1.1,<br>3-ПК-1.2,<br>У-ПК-1.2,<br>В-ПК-1.2,<br>3-ПК-4,<br>У-ПК-4,<br>В-ПК-4,<br>3-ПК-8,<br>У-ПК-8,<br>В-ПК-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  |
|-------------|----------------------|
| СК          | Семестровый контроль |
| Э           | Экзамен              |

### КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

| Недели      | Темы занятий / Содержание                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Лек.,<br>час.          | Пр./сем.,<br>час. | Лаб.,<br>час. |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|-------------------|---------------|
|             | <i>2 Семестр</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 15                     | 30                | 15            |
| <b>1-8</b>  | <b>Введение. Термодатчики для исследования нестационарных процессов.</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 8                      | 15                | 8             |
| 1 - 2       | <b>Введение.</b><br>Необходимость изучения нестационарных тепловых процессов в ядерных энергетических установках.<br>Экспериментальное исследование и математическое моделирование. Цели и задачи курса                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Всего аудиторных часов |                   |               |
|             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 2                      | 4                 | 2             |
|             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Онлайн                 |                   |               |
|             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 0                      | 0                 | 0             |
| 3 - 4       | <b>Термодатчики для исследования нестационарных процессов.</b><br>Термодатчики для измерения нестационарных тепловых процессов. Основные требования, предъявляемые к термометрам при исследовании нестационарных тепловых процессов. Резистивные, емкостные, индуктивные термоэлектрические термометры, их основные характеристики и конструкции. Требования к чувствительному элементу резистивного термометра и способы его монтажа. Термоэлектрические термометры. Принцип их работы, преимущества и недостатки. Понятие о тепловой инерции термодатчика. Постоянная времени термодатчика и термопары. | Всего аудиторных часов |                   |               |
|             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 2                      | 4                 | 2             |
|             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Онлайн                 |                   |               |
|             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 0                      | 0                 | 0             |
| 5 - 6       | <b>Измерительные схемы.</b><br>Измерительные схемы для исследования нестационарных тепловых процессов и основные к ним требования.<br>Мостовые схемы, чувствительность мостовой схемы.<br>Равновесные и разбалансированные мостовые схемы.<br>Измерительные приборы для исследования нестационарных электрических сигналов. Аналоговые и цифровые приборы. Аналого-цифровые преобразователи (АЦП). Принцип работы АЦП, временные диаграммы.<br>Основные характеристики современных АЦП                                                                                                                    | Всего аудиторных часов |                   |               |
|             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 2                      | 4                 | 2             |
|             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Онлайн                 |                   |               |
|             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 0                      | 0                 | 0             |
| 7 - 8       | <b>Введение в среду LabVIEW.</b><br>Блочные диаграммы виртуальных приборов. Лицевые панели для описания интерфейса виртуального прибора.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Всего аудиторных часов |                   |               |
|             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 2                      | 3                 | 2             |
|             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Онлайн                 |                   |               |
|             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 0                      | 0                 | 0             |
| <b>9-15</b> | <b>Нестационарные процессы в жидкости.</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 7                      | 15                | 7             |
| 9 - 10      | <b>Нестационарные процессы в жидкости.</b><br>Нестационарные тепловые процессы в жидкости при увеличении тепловой нагрузки. Методика проведения экспериментов. Характерные интервалы времени режимов теплообмена и достижимые перегревы греющей стенки при ступенчатом увеличении тепловой нагрузки. Понятие                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Всего аудиторных часов |                   |               |
|             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 2                      | 3                 | 2             |
|             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Онлайн                 |                   |               |
|             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 0                      | 0                 | 0             |

|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                        |   |   |
|---------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|---|---|
|         | нестационарного критического теплового потока.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                        |   |   |
| 11 - 12 | <b>Динамические характеристики тепловых процессов.</b><br>Оценка значения нестационарного критического теплового потока на примере жидкого гелия, азота и воды. Критический интервал времени до момента перехода к пленочному кипению при ступенчатом увеличении тепловой нагрузки. Методика приближенного расчета критического интервала времени. Динамические характеристики закипания воды | Всего аудиторных часов |   |   |
|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 2                      | 3 | 2 |
|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Онлайн                 |   |   |
|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 0                      | 0 | 0 |
| 13 - 14 | <b>Решение задач теплопроводности методом конечных элементов.</b><br>Основные идеи метода конечных элементов (МКЭ). Построение дискретной модели и функций формы элементов. Система уравнений МКЭ. Локальная и глобальная матрицы. Решение системы уравнений МКЭ.                                                                                                                             | Всего аудиторных часов |   |   |
|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 1                      | 3 | 1 |
|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Онлайн                 |   |   |
|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 0                      | 0 | 0 |
| 15      | <b>Программные комплексы для моделирования задач теплообмена с помощью МКЭ</b><br>Программный комплекс FLEX.PDE.<br>Программный комплекс ANSYS.                                                                                                                                                                                                                                               | Всего аудиторных часов |   |   |
|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 1                      | 3 | 1 |
|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Онлайн                 |   |   |
|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 0                      | 0 | 0 |
| 16      | <b>Решение задач теплообмена излучением</b><br>Теплообмен в системе серых тел с диффузным отражением. Расчет угловых коэффициентов. Вычисление кратных интегралов. Метод статистической имитации. Теплообмен в системе тел с зеркальным и диффузным отражением. Расчет разрешающих угловых коэффициентов                                                                                      | Всего аудиторных часов |   |   |
|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 1                      | 3 | 1 |
|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 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 ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

| Недели | Темы занятий / Содержание                                                                                                                                                                                                                                       |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|        | <i>2 Семестр</i>                                                                                                                                                                                                                                                |
| 1 - 2  | <b>1. Знакомство с программным комплексом FlexPDE.</b><br>Знакомство с интерфейсом программы. Основные операторы языка сценария.                                                                                                                                |
| 3 - 4  | <b>2. Стационарное поле температур в поперечном сечении стержневого тепловыделяющего элемента</b><br>Разработка сценария для описания стационарных двумерных процессов теплообмена.<br>Расчет поля температур в поперечном сечении стержневого тепловыделяющего |

|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|         | элемента для случаев изотропных и анизотропных по азимуту граничных условий.                                                                                                                                                                                                                                             |
| 5 - 6   | <b>3. Трехмерное стационарное поле температур в стержневом тепловыделяющем элементе</b><br>Разработка сценария для описания стационарных трехмерных процессов теплообмена. Расчет поля температур в стержневом тепловыделяющем элементе для случаев изотропных и анизотропных по азимуту и высоте граничных условий.     |
| 7 - 8   | <b>4. Трехмерное нестационарное поле температур в стержневом тепловыделяющем элементе</b><br>Разработка сценария для описания нестационарных трехмерных процессов теплообмена. Расчет поля температур в стержневом тепловыделяющем элементе для случаев изотропных и анизотропных по азимуту и высоте граничных условий. |
| 9 - 10  | <b>5. Трехмерные стационарные поля температур и скоростей теплоносителя в тепловыделяющей сборке ВВЭР</b><br>Описание теплогидравлических процессов в сборке ВВЭР в приближении анизотропного пористого тела. Разработка сценария и расчет поля скоростей и температур во фрагменте сборки по высоте.                    |
| 11 - 12 | <b>6. Методы расчета угловых коэффициентов</b><br>Сравнение методов расчета многомерных интегралов, необходимых при расчете угловых коэффициентов                                                                                                                                                                        |
| 13 - 16 | <b>7. Экспериментальное исследование динамических характеристик кипения воды при импульсном теплоподводе</b><br>Определение времени закипания и время развития конвекции при импульсном теплоподводе в большом объеме насыщенной воды.                                                                                   |

## ТЕМЫ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

| Недели | Темы занятий / Содержание                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|        | <i>2 Семестр</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|        | <b>В качестве практических занятий даются домашние задания, которые есть в приложении.</b><br>В качестве практических занятий даются домашние задания, которые есть в приложении.                                                                                                                                                         |
| 3 - 4  | <b>2. Стационарное поле температур в поперечном сечении стержневого тепловыделяющего элемента</b><br>Разработка сценария для описания стационарных двумерных процессов теплообмена. Расчет поля температур в поперечном сечении стержневого тепловыделяющего элемента для случаев изотропных и анизотропных по азимуту граничных условий. |
| 5 - 6  | <b>3. Трехмерное стационарное поле температур в стержневом тепловыделяющем элементе</b><br>Разработка сценария для описания стационарных трехмерных процессов теплообмена. Расчет поля температур в стержневом тепловыделяющем элементе для случаев изотропных и анизотропных по азимуту и высоте граничных условий.                      |
| 7 - 8  | <b>4. Трехмерное нестационарное поле температур в стержневом тепловыделяющем элементе</b><br>Разработка сценария для описания нестационарных трехмерных процессов теплообмена. Расчет поля температур в стержневом тепловыделяющем элементе для случаев изотропных и анизотропных по азимуту и высоте граничных условий.                  |
| 9 - 10 | <b>5. Трехмерные стационарные поля температур и скоростей теплоносителя в тепловыделяющей сборке ВВЭР</b><br>Описание теплогидравлических процессов в сборке ВВЭР в приближении анизотропного пористого тела. Разработка сценария и расчет поля скоростей и температур во фрагменте сборки по высоте.                                     |

|         |                                                                                                                                                                                                                                        |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 11 - 12 | <b>6. Методы расчета угловых коэффициентов</b><br>Сравнение методов расчета многомерных интегралов, необходимых при расчете угловых коэффициентов                                                                                      |
| 13 - 16 | <b>7. Экспериментальное исследование динамических характеристик кипения воды при импульсном теплоподводе</b><br>Определение времени закипания и время развития конвекции при импульсном теплоподводе в большом объеме насыщенной воды. |

## ТЕМЫ СЕМИНАРОВ

| Недели  | Темы занятий / Содержание                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|---------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|         | <i>2 Семестр</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| 1 - 2   | <b>Введение.</b><br>Необходимость изучения нестационарных тепловых процессов в ядерных энергетических установках. Экспериментальное исследование и математическое моделирование. Цели и задачи курса                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| 3 - 4   | <b>Термодатчики для исследования нестационарных процессов.</b><br>Термодатчики для измерения нестационарных тепловых процессов. Основные требования, предъявляемые к термометрам при исследовании нестационарных тепловых процессов. Резистивные, емкостные, индуктивные термоэлектрические термометры, их основные характеристики и конструкции. Требования к чувствительному элементу резистивного термометра и способы его монтажа. Термоэлектрические термометры. Принцип их работы, преимущества и недостатки. Понятие о тепловой инерции термодатчика. Постоянная времени термодатчика и термопары. |
| 5 - 6   | <b>Измерительные схемы.</b><br>Измерительные схемы для исследования нестационарных тепловых процессов и основные к ним требования. Мостовые схемы, чувствительность мостовой схемы. Равновесные и разбалансированные мостовые схемы. Измерительные приборы для исследования нестационарных электрических сигналов. Аналоговые и цифровые приборы. Аналого-цифровые преобразователи (АЦП). Принцип работы АЦП, временные диаграммы. Основные характеристики современных АЦП                                                                                                                                |
| 7 - 8   | <b>Введение в среду LabVIEW.</b><br>Блочные диаграммы виртуальных приборов. Лицевые панели для описания интерфейса виртуального прибора.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 9 - 10  | <b>Нестационарные процессы в жидкости.</b><br>Нестационарные тепловые процессы в жидкости при увеличении тепловой нагрузки. Методика проведения экспериментов. Характерные интервалы времени режимов теплообмена и достижимые перегревы греющей стенки при ступенчатом увеличении тепловой нагрузки. Понятие нестационарного критического теплового потока.                                                                                                                                                                                                                                               |
| 11 - 12 | <b>Динамические характеристики тепловых процессов.</b><br>Оценка значения нестационарного критического теплового потока на примере жидкого гелия, азота и воды. Критический интервал времени до момента перехода к пленочному кипению при ступенчатом увеличении тепловой нагрузки. Методика приближенного расчета критического интервала времени. Динамические характеристики закипания воды                                                                                                                                                                                                             |
| 13 - 14 | <b>Решение задач теплопроводности методом конечных элементов.</b><br>Основные идеи метода конечных элементов (МКЭ). Построение дискретной модели и функций формы элементов. Система уравнений МКЭ. Локальная и глобальная матрицы. Решение системы уравнений МКЭ.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 15      | <b>Программные комплексы для моделирования задач теплообмена с помощью МКЭ</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |

|    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    | Программный комплекс FLEX.PDE.<br>Программный комплекс ANSYS.                                                                                                                                                                                                                                               |
| 16 | <b>Решение задач теплообмена излучением</b><br>Теплообмен в системе серых тел с диффузным отражением. Расчет угловых коэффициентов. Вычисление кратных интегралов. Метод статистической имитации.<br>Теплообмен в системе тел с зеркальным и диффузным отражением. Расчет разрешающих угловых коэффициентов |

## 5. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

В соответствии с требованиями ОС НИЯУ МИФИ по направлению "Ядерные физика и технологии", курс «Методы исследования нестационарных тепловых процессов» реализует компетентностный подход и предусматривает широкое использование в учебном процессе активных форм проведения занятий (компьютерные практикумы, разбор домашних заданий, система контрольно-измерительных материалов, включая тесты) в сочетании с внеаудиторной работой с целью формирования и развития профессиональных навыков студентов.

## 6. 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-1.1      | З-ПК-1.1            | Э, СК-8, СК-15                    |
|             | У-ПК-1.1            | Э, СК-8, СК-15                    |
|             | В-ПК-1.1            | Э, СК-8, СК-15                    |
| ПК-1.2      | З-ПК-1.2            | Э, СК-8, СК-15                    |
|             | У-ПК-1.2            | Э, СК-8, СК-15                    |
|             | В-ПК-1.2            | Э, СК-8, СК-15                    |
| ПК-4        | З-ПК-4              | Э, СК-8, СК-15                    |
|             | У-ПК-4              | Э, СК-8, СК-15                    |
|             | В-ПК-4              | Э, СК-8, СК-15                    |
| ПК-8        | З-ПК-8              | Э, СК-8, СК-15                    |
|             | У-ПК-8              | Э, СК-8, СК-15                    |
|             | В-ПК-8              | Э, СК-8, СК-15                    |

## 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-х 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»                 | B           | 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        |                              | C           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 70-74        |                              | D           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 65-69        | 3 – «удовлетворительно»      | E           | 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»    | F           | 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. |

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

### ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. ЭИ B27 Numerical Approximation of Partial Differential Equations : , Bartels, Soren. , Cham: Springer International Publishing, 2016
2. ЭИ L44 Partial Differential Equations: Modeling, Analysis and Numerical Approximation : , Lucquin, Brigitte. , Le Dret, Herve. , Cham: Springer International Publishing, 2016
3. ЭИ Я49 Технологические процессы производства тепловой и электрической энергии на АЭС : учебное пособие для вузов, Пинчук М.Э., Якубенко И.А., Москва: НИЯУ МИФИ, 2013
4. ЭИ C12 Физическая теория ядерных реакторов Ч.2 Теория возмущений и медленные нестационарные процессы, Савандер В.И., Москва: НИЯУ МИФИ, 2013

5. 621.039 И85 Ядерно-физические контрольно-измерительные приборы : учебное пособие, Исаков С.В., Москва: НИЯУ МИФИ, 2012

6. ЭИ И85 Ядерно-физические контрольно-измерительные приборы : учебное пособие для вузов, Исаков С.В., Москва: НИЯУ МИФИ, 2012

#### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. 004 И88 Использование виртуальных инструментов LabVIEW : , Каратаев В.В. [и др.], М.: Солон-Р и др., 1999

2. 621.039 М31 Моделирование теплогидравлических процессов в реакторных установках и элементах теплообменного оборудования ЯЭУ : лабораторный практикум: учебное пособие для вузов, Рябов Н.О., Меринов И.Г., Маслов Ю.А., Москва: МИФИ, 2008

3. 536 К79 Основы теплопередачи : , Крейт Ф., Блэк У., Москва: Мир, 1983

4. 533 Д81 Применение ЭВМ для решения задач теплообмена : учеб. пособие для вузов, Сигалов А.В., Дульнев Г.Н., Парфенов В.Г., Москва: Высшая школа, 1990

5. 621.039 С12 Физическая теория ядерных реакторов Ч.2 Теория возмущений и медленные нестационарные процессы, Савандер В.И., Москва: НИЯУ МИФИ, 2013

6. 620 Ф50 Физическое материаловедение Т.6 Конструкционные материалы ядерной техники, , Москва: НИЯУ МИФИ, 2012

7. 519 С17 Численные методы и программирование на Фортране для персонального компьютера : , Самохин А.Б., Самохина А.С., М.: Радио и связь, 1996

8. 519 Б30 Численные методы. Решения задач и упражнения : учебное пособие для вузов, Бахвалов Н.С., Чижонков Е.В., Корнев А.А., Москва: Дрофа, 2009

#### ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ:

Специальное программное обеспечение не требуется

#### LMS И ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСЫ:

1. Росатом ([www.rosatom.ru](http://www.rosatom.ru))

2. Росэнергоатом (<http://www.rosenergoatom.ru>)

3. [http://www.atomsib.ru/sci/museum/history/daty\\_otrasli.html](http://www.atomsib.ru/sci/museum/history/daty_otrasli.html)  
([http://www.atomsib.ru/sci/museum/history/daty\\_otrasli.html](http://www.atomsib.ru/sci/museum/history/daty_otrasli.html))

4. <http://www.pdesolutions.com> (<http://www.pdesolutions.com>)

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

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

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

Специальное материально-техническое обеспечение не требуется

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

При выполнении лабораторных работ и домашнего задания требуется самостоятельная разработка сценария решения поставленной задачи пакетом FlexPDE. Для выполнения домашнего задания №1 студент может пользоваться любым математическим пакетом символьной математики. В качестве справочной литературы по синтаксису языка разработки сценариев при этом можно использовать учебное пособие Маслов Ю.А., Меринов И.Г., Рябов Н.О. Моделирование теплогидравлических процессов в реакторных установках и элементах теплообменного оборудования ЯЭУ. Лабораторный практикум, 156 с., 2008, а также встроенные в пакет систему помощи и набор примеров решения типовых задач.

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

Лекционный курс строится по следующему плану: сначала вводятся и обсуждаются основные понятия и исходные положения курса, излагаются основные законы и уравнения. Потом рассматриваются методы, с помощью которых разбираются важнейшие энергетические приложения тепловых процессов: свойства рабочих тел, процессы течения газов и жидкостей, циклы преобразования энергии в энергетических установках, в том числе в ядерных.

С целью выработки профессиональных компетенций студентов на лекциях и семинарских занятиях используется интерактивная форма проведения лекционных (20%) и семинарских занятий (75%). Активная форма проведения лекционных занятий предполагает, в частности, что студенты углубленно изучают по рекомендуемой преподавателем литературе те разделы лекционного курса, которые не рассматриваются детально на лекциях, но необходимы для дальнейшего изучения курса.

Автор(ы):

Куценко Кирилл Владленович, к.т.н., доцент

Рецензент(ы):

доцент Харитонов В.С., доцент Корсун А.С.