

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

**Нововоронежский политехнический институт** –  
филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования  
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
**(НВПИ НИЯУ МИФИ)**

УТВЕРЖДЕН:

Педагогическим советом

«17» *марта* 2023г., протокол № 550

**ФОНД  
ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ  
«Физика ядерных реакторов»**

**Направление подготовки:** 14.03.01. Ядерная энергетика и теплофизика

**Наименование образовательной программы:** Эксплуатация, техническое обслуживание и ремонт оборудования АЭС

**Уровень образования:** бакалавриат

**Форма обучения:** очная

Нововоронеж 2023 г.

**Паспорт**  
**фонда оценочных средств**  
**по дисциплине «Физика ядерных реакторов»**

**1. Модели контролируемых компетенций:**

Оценочные средства для текущего контроля направлены на проверку знаний и умений студентов, являющихся основой формирования у обучающихся компетенций:

ПК-1 – Способен к участию в разработке методов прогнозирования количественных характеристик процессов, протекающих в конкретных технических системах на основе существующих методик.

ПК-4 – Способен применять стандартные пакеты прикладных программ для математического моделирования процессов и режимов работы пакетов

ПК-17- Способен анализировать технологическую документацию с целью повышения эффективности производства и обеспечения качества выпускаемой продукции

ПК-18- Способен участвовать в демонтаже, ремонте, проверке, монтаже, наладки оборудования, проведения входного контроля поступившего оборудования

Согласно рабочему учебному плану направления в формировании данных компетенций участвуют дисциплины и виды практик:

ПК-1

Химия

Информатика

Линейная алгебра. Аналитическая геометрия. Начала анализа

Математический анализ

Дифференциальные уравнения. Теория рядов

Теория вероятностей. Математическая статистика

Общая физика (Механика. Молекулярная физика и основы термодинамики)

Общая физика (Электричество и магнетизм)

Общая физика (Волны и оптика)

Общая физика (Элементы квантовой физики атомов и физики атомного ядра )

Физика ядерных реакторов

Принципы обеспечения безопасности АЭС

Культура безопасности

Учебная практика (ознакомительная)

Учебная практика (технологическая)

Производственная практика (эксплуатационная)

Производственная практика (преддипломная)

Подготовка к процедуре защиты и защита выпускной квалификационной работы

ПК-4

Начертательная геометрия и инженерная графика

Тепломассообмен

Электротехника и электроника

Теория переноса нейтронов  
Физика ядерных реакторов  
Гидродинамика энергетических установок  
Учебная практика (ознакомительная)  
Учебная практика (технологическая)  
Производственная практика (эксплуатационная)  
Производственная практика (преддипломная)  
Подготовка к процедуре защиты и защита выпускной квалификационной работы  
ПК-17

Начертательная геометрия и инженерная графика  
Техническая термодинамика  
Общая энергетика  
Организация производства и менеджмент  
Физика ядерных реакторов  
Обеспечение радиационной безопасности  
Основы профессиональной коммуникации на иностранном языке  
Неразрушающие методы контроля оборудования АЭС  
Принципы обеспечения безопасности АЭС  
Культура безопасности  
Обращение с ядерным топливом и радиоактивными отходами  
Эксплуатация АЭС  
Эксплуатация турбомашин АЭС  
Учебная практика (ознакомительная)  
Учебная практика (технологическая)  
Производственная практика (эксплуатационная)  
Производственная практика (преддипломная)  
Подготовка к процедуре защиты и защита выпускной квалификационной работы  
ПК-18

Физика ядерных реакторов  
Теплообменные аппараты и парогенераторы  
Тепломассобмен  
Техническое диагностирование технологического оборудования  
Испытание и наладка энергетического оборудования  
Экспериментальные методы исследований на АЭС  
Учебная практика (ознакомительная)  
Учебная практика (технологическая)  
Производственная практика (эксплуатационная)  
Производственная практика (преддипломная)  
Подготовка к процедуре защиты и защита выпускной квалификационной работы

В результате освоения дисциплины студент должен:

**Знать:**

**3.1.** методы прогнозирования количественных характеристик процессов, протекающих в конкретных технических системах на основе существующих методик;

**3.2.** стандартные пакеты прикладных программ для математического моделирования

процессов и режимов работы объектов;

**3.3.** технологическую документацию выпускаемой продукции;

**3.4.** демонтаж, ремонт, проверку, монтаж, наладку оборудования;

**Уметь:**

**У.1.** прогнозирования количественных характеристик процессов, протекающих в конкретных технических системах на основе существующих методик;

**У.2.** применять стандартные пакеты прикладных программ для математического моделирования процессов и режимов работы объектов;

**У.3.** анализировать технологическую документацию с целью повышения эффективности производства и обеспечения качества выпускаемой продукции;

**У.4.** проводить входной контроль поступившего оборудования.

**Владеть:**

**В.1.** методами прогнозирования количественных характеристик процессов, протекающих в конкретных технических системах на основе существующих методик;

**В.2.** навыками работы со стандартными пакетами прикладных программ для математического моделирования процессов и режимов работы объектов;

**В.3.** методами анализа технологической документации с целью повышения эффективности производства и обеспечения качества выпускаемой продукции

**В.4.** навыками демонтажа, ремонта, проверки, монтажа, наладки оборудования, проведения входного контроля поступившего оборудования.

Соотнесение знаний, умений и навыков с компетенциями приведено в таблице:

Индекс компетенции	Проектируемые результаты освоения дисциплины «Ремонт и наладка устройств релейной защиты и автоматизации» и индикаторы формирования компетенций			Средства и технологии оценки
	Знания (З)	Умения (У)	Навыки (В)	
ПК-1	3.1,	У.1,	В.1,	УО КР1 Т1 КР2 ПР1
ПК-4	3.2,	У.2	В.2	
ПК-17	3.3,	У.3	В.3	
ПК-18	3.4,	У.4	В.4	

Формой аттестации по дисциплине «Физика ядерных реакторов» является экзамен.

## **2. Программа оценивания контролируемой компетенции:**

№ п/п	Контролируемые модули, разделы (темы) дисциплины*	Рубежный контроль	Макс. балл	Компетенции	Распределение баллов
Семестр 5					

№ п/п	Контролируемые модули, разделы (темы) дисциплины*	Рубежный контроль	Макс. балл	Компетенции	Распределение баллов
1	Нейтронно-физические процессы в ядерных реакторах	7 – Т	25	ПК-1 ПК-4 ПК-17 ПК-18	КР1 – 15б. Т1 – 10б.
2	Нейтронно-физический расчёт ядерных реакторов	17 – Т	35	ПК-1 ПК-4 ПК-17 ПК-18	КР2 – 10б. Т2 – 10б. ПР1 – 15б.
	Экзамен		40	ПК-1 ПК-4 ПК-17 ПК-18	Э1 – 40 б.
	Итого		100	–	100

Формами аттестации по дисциплине являются решение задач (РЗ), тест (Т), устный опрос (УО), практическая работа (ПР) и экзамен (Э).

Оценивание контролируемых компетенций по разделам:

№ п/п	Контролируемые разделы (темы) дисциплины	Код контролируемой компетенции (или ее части)	Наименование оценочного средства
<b>Раздел 1. Нейтронно-физические процессы в ядерных реакторах</b>			
1	Основные положения теории переноса нейтронов Спектр замедляющихся нейтронов. Замедление со слабым поглощением Замедление с резонансным поглощением. Спектр Вигнера Возраст нейтронов. Уравнение возраста Уравнение диффузии с источником в виде плотности замедления Критичность реактора с учетом замедляющихся нейтронов Неравномерность нейтронного поля. Коэффициенты неравномерности	ПК-1 ПК-4 ПК-17 ПК-18	Т1 ПР1
<b>Раздел 2. Нейтронно-физический расчёт ядерных реакторов</b>			

№ п/п	Контролируемые разделы (темы) дисциплины	Код контролируемой компетенции (или ее части)	Наименование оценочного средства
2	<p>Реактор с отражателем в одногрупповом приближении</p> <p>Реактор с отражателем в двухгрупповом приближении</p> <p>Управление нейтронным полем. Физическое профилирование</p> <p>Введение в метод многих групп</p> <p>Метод многих групп (продолжение). Обзор многогрупповых нейтронно-физических кодов</p> <p>Гетерогенные ядерные реакторы, их физические особенности. Введение в теорию решётки</p> <p>Гетерогенные ядерные реакторы. Коэффициенты нейтронного цикла</p> <p>Гетерогенные ядерные реакторы. Расчёт блок-эффекта</p> <p>Гетерогенные ядерные реакторы. Оптимизация соотношения топливо-замедлитель</p>	ПК-1 ПК-4 ПК-17 ПК-18	T2 PR2

Экзаменационная оценка выставляется преподавателем с учетом всех представленных студентами работ по дисциплине в течение семестра.

Формулировка результата	Показатели освоения результата	Средства оценки	Формируемые компетенции
<b>В результате освоения дисциплины студент должен знать</b>			
<b>3.1.</b> методы прогнозирования количественных характеристик процессов, протекающих в конкретных технических системах на основе существующих методик	Умение записать (желательно – вывести) уравнение диффузии нейтронов, уравнение возраста, умение пояснить их смысл и все входящие величины	T1 Э	ПК-1
<b>3.2.</b> стандартные пакеты прикладных программ для математического моделирования процессов и режимов работы объектов	Умение записать условие критичности реактора, найти критические размеры реакторов различных форм, учесть влияние отражателя,	T1 T2 Э	ПК-4
<b>3.3.</b> технологическую документацию	Уметь связать состав активных зон реакторов	T3 Э	ПК-17

<b>Формулировка результата</b>	<b>Показатели освоения результата</b>	<b>Средства оценки</b>	<b>Формируемые компетенции</b>
выпускаемой продукции особенности водо-водяных (включая кипящие), водо-графитовых канальных, газографитовых реакторов на тепловых нейтронах, а также реакторов на быстрых нейтронах	различных типов с их нейтронно-физическими свойствами и конструкцией, неравномерностью энерговыделения		
<b>3.4.</b> особенности работы, связанные с изменением состава активной зоны реактора во время кампании	Знание закономерностей, связывающих выработку энергии с выгоранием ядерного топлива, отравлением и шлакованием реактора, наработкой вторичного топлива	Т2 Э	ПК-18
<b>В результате освоения дисциплины студент должен уметь</b>			
<b>У.1.</b> прогнозирования количественных характеристик процессов, протекающих в конкретных технических системах на основе существующих методик	Расчет ядерных концентраций и макросечений в ячейке реактора, учет усреднения сечений взаимодействия для тепловых нейтронов по спектру Максвелла	ПР1 ПР3	ПК-1
<b>У.2.</b> применять стандартные пакеты прикладных программ для математического моделирования процессов и режимов работы объектов	Расчет коэффициента размножения реактора на тепловых нейтронах в однокрупном диффузионно-возрастном приближении	ПР1 ПР3	ПК-4
<b>У.3.</b> анализировать технологическую документацию с целью повышения эффективности производства и	Рассчитать для энергетического реактора на тепловых нейтронах вклад в реактивность температурного эффекта, плотностного эффекта, связанного с	ПР3	ПК-17

<b>Формулировка результата</b>	<b>Показатели освоения результата</b>	<b>Средства оценки</b>	<b>Формируемые компетенции</b>
обеспечения качества выпускаемой продукции	концентрацией борной кислоты в ВВЭР, вклад стационарного и нестационарного отравления Хе и Sm		
<b>У.4.</b> проводить входной контроль поступившего оборудования	Уметь оценить скорости выгорания и наработки ядерного топлива, учесть вклад отравления ксеноном и самарием, рассчитать неравномерность выгорания топлива для простой конфигурации загрузки	ПР4	ПК-18
<b>В результате освоения дисциплины студент должен владеть</b>			
<b>В.1.</b> методами прогнозирования количественных характеристик процессов, протекающих в конкретных технических системах на основе существующих методик	Умение выбрать необходимые микросечения взаимодействий для расчета в выбранном приближении для различного числа групп нейтронов	ПР3 ПР4	ПК-1
<b>В.2.</b> навыками работы со стандартными пакетами прикладных программ для математического моделирования процессов и режимов работы объектов	Программирование в математических пакетах или электронных таблицах расчетов, требующих многократного повторения однотипных вычислений, в т.ч. и итерационны	ПР3 ПР4	КП-4

### 3. Оценочные средства

#### 3.1. Практические работы семестра 5

**Практическая работа № 3 (ПР3). Расчет ядерного реактора на тепловых нейтронах.**



**Цель работы:** освоить метод нейтронно-физического расчета ядерного реактора на тепловых нейтронах в диффузионно-возрастном приближении с учетом одной группы замедляющихся нейтронов.

### **Содержание задания:**

Выполнить расчёт коэффициента размножения активной зоны и определить параметры неравномерности нейтронного поля в соответствии с методическими указаниями «Физический расчет ядерного реактора на тепловых нейтронах. Методические указания к практической работе. Часть 1. Расчет коэффициента размножения активной зоны», входящими в состав УМКД дисциплины.

Вариант задания принять равным своему номеру в журнале группы или по указанию преподавателя. Выбор между а- и б-вариантами топливной загрузки по усмотрению преподавателя.

### **Аттестация работы:**

Пояснительная записка по ПРЗ и файл расчёта (в формате электронной таблицы или математического пакета) сдаются не позднее 7-й недели 8 семестра.

### **Оценивание работы**

Полная «стоимость» ПРЗ составляет 18 баллов, из которых 10 относится к выполнению и оформлению расчёта, а 8 – к защите работы.

#### **Оценивание расчёта**

10 баллов – расчёты выполнены верно, оформление корректно, пояснительная записка и файл расчёта предоставлены в срок;

За каждую неделю просрочки сдачи рекомендуется снижать оценку на 1 балл, но не более, чем до 6 баллов.

#### **Оценивание защиты**

8 баллов – студент уверенно ориентируется в собственноручно выполненных пояснительной записке и файле расчёта, может объяснить физический смысл всех использованных величин и формул, отвечает на общие вопросы по дисциплине;

6-7 баллов – студент недостаточно уверенно ориентируется в собственноручно выполненных пояснительной записке и файле расчёта, затрудняется объяснить физический смысл наиболее сложных понятий и формул, использованных в работе, отвечает на общие вопросы по дисциплине

4-5 баллов – студент недостаточно уверенно ориентируется в собственноручно выполненных пояснительной записке и файле расчёта, в общих чертах представляет себе смысл проделанной работы, отвечает на общие вопросы по дисциплине

0 баллов и неаттестация раздела – студент не выполнил самостоятельно пояснительную записку и расчёт, либо совершенно в них не ориентируется, либо не способен объяснить смысл проделанной работы

### **Контрольные вопросы к защите работы:**

1. Поясните физический смысл каждого из четырех сомножителей.
2. Как изменится средняя температура нейтронного газа с ростом обогащения топлива в Вашем задании? С ростом параметров теплоносителя?
3. Как изменится результат расчета (геометрия активной зоны, Кэф), если в задании будет дана мощность выше, чем у Вас?
4. Поясните физический смысл эффективного резонансного интеграла.
5. Объясните, почему коэффициент размножения на быстрых нейтронах получается настолько незначительным?
6. Как вычислить критические размеры для реактора с Вашей конфигурацией и параметрами ячейки?
7. Объясните физический смысл величины ... (по выбору преподавателя)
8. Объясните физический смысл формулы ... (по выбору преподавателя)

### **Практическая работа № 4 (ПР4). Вопросы безопасности ядерного реактора на тепловых нейтронах.**

**Цель работы:** освоить простые способы оценки ядерной безопасности топливных загрузок.

#### **Содержание задания:**

- оценить температурные эффекты реактивности (а следовательно, и уровень ядерной безопасности) активной зоны заданного состава;
- сравнить уровень ядерной безопасности разреженных и тесных уран-водных решёток;

– оценить состав активной зоны, который обеспечит компенсацию начального запаса реактивности топливной загрузки,

в соответствии с методическими указаниями «Физический расчет ядерного реактора на тепловых нейтронах. Методические указания к практической работе. Часть 2. Вопросы ядерной безопасности и кинетики ядерного реактора», входящими в состав УМКД дисциплины. Исходные данные для расчёта взять в части 1 указанных методических указаний (продолжить ПР3).

### **Аттестация работы:**

Пояснительная записка по ПР4 и файл расчёта (в формате электронной таблицы или математического пакета) сдаются не позднее 7-й недели 8 семестра.

### **Оценивание работы**

Полная «стоимость» ПР4 составляет 32 баллов, из которых 18 относятся к выполнению и оформлению расчёта, а 14 – к защите работы.

#### Оценивание расчёта

18 баллов – расчёты выполнены верно, оформление корректно, пояснительная записка и файл расчёта предоставлены в срок;

За каждую неделю просрочки сдачи рекомендуется снижать оценку на 1 балл, но не более, чем до 11 баллов.

#### Оценивание защиты

14 баллов – студент уверенно ориентируется в собственноручно выполненных пояснительной записке и файле расчёта, может объяснить физический смысл всех использованных величин и формул, отвечает на общие вопросы по дисциплине;

11-13 баллов – студент недостаточно уверенно ориентируется в собственноручно выполненных пояснительной записке и файле расчёта, затрудняется объяснить физический смысл наиболее сложных понятий и формул, использованных в работе, отвечает на общие вопросы по дисциплине

7-10 баллов – студент недостаточно уверенно ориентируется в собственноручно выполненных пояснительной записке и файле расчёта, в общих чертах представляет себе смысл проделанной работы, отвечает на общие вопросы по дисциплине

0 баллов и неаттестация раздела – студент не выполнил самостоятельно пояснительную записку и расчёт, либо совершенно в них не ориентируется, либо не способен объяснить смысл проделанной работы

### **Контрольные вопросы к защите работы:**

1. Что такое коэффициент реактивности?
2. Объясните, почему коэффициент реактивности по топливу имеет отрицательный знак.
3. Объясните форму кривой зависимости запаса реактивности от водно-уранового соотношения.
4. Чем тесные уран-водные решётки безопаснее разреженных?
5. Какие свойства бора позволяют его использовать для регулирования и компенсации запаса реактивности?
6. Как наличие бора в теплоносителе ВВЭР влияет на температурный коэффициент реактивности?
7. Объясните физический смысл величины ... (по выбору преподавателя)
8. Объясните физический смысл формулы ... (по выбору преподавателя)

### **Практическая работа №3. Расчет наработки вторичного топлива по упрощенной модели.**

**Цель работы:** изучение динамики изменения нуклидного состава активной зоны реактора на тепловых нейтронах.

#### **Содержание задания:**

Построить ступенчатые графики зависимости массы U-235, U-238 и Pu-239 от времени, если считать, что: начальное обогащение 4%, уран-238 непосредственно превращается в плутоний с коэффициентов  $KV=0,7; 1,0; 1,3$ . Считать, что от ядра плутония выход энергии 205 МэВ, от урана 190 МэВ. Считать, что на 100 разделившихся ядер делящихся нуклидов делится 4 ядра урана-238 быстрыми нейтронами.

Тепловая мощность 3000 МВт. Загрузка топлива 80 т. Длина кампании 900 сут. Ежегодные перегрузки не учитывать. При расчете вручную кампания делится на 15 периодов по 60 суток.

Сечение деления урана-235 –  $\sigma_{f5}$  (барн), захвата –  $\sigma_{a5}$  (барн); плутония соответственно 500 и 600 барн. Сечения считать уже усредненными по спектру Максвелла.

Расчет выполняется: для первых трех 60-суточных периодов вручную, после чего производится автоматизация расчета в электронной таблице или математическом пакете. В случае расчета в математическом пакете возможно непосредственное получение искомых графиков решением дифференциальных уравнений динамики концентраций нуклидов.

Вспомогательные формулы к расчету. Теплота, выделенная от конкретного  $i$ -го нуклида

$$N_{Ti} = N_T \frac{m_i \cdot \sigma_{f,i}}{\sum_i m_i \cdot \sigma_{f,i}}$$

**Варианты задания:**

Вариант	КВ	Начальное обогащение $x$ , %	Сечения урана $\sigma_{f5}/\sigma_{a5}$ , барн	Сечения плутония $\sigma_{f9}/\sigma_{a9}$ , барн
1	0,75	2,5	350/410	590/895
2	0,7	3,0	350/410	590/895
3	0,65	3,5	350/410	590/895
4	0,6	4,0	350/410	590/895
5	0,75	2,5	260/305	910/1540
6	0,7	3,0	260/305	910/1540
7	0,65	3,5	260/305	910/1540
8	0,6	4,0	260/305	910/1540
9	0,75	2,5	210/250	950/1650
10	0,7	3,0	210/250	950/1650
11	0,65	3,5	210/250	950/1650
12	0,6	4,0	210/250	950/1650
13	0,75	2,5 + 1%Pu-239	350/410	590/895
14	0,7	3,0 + 1%Pu-239	350/410	590/895
15	0,65	3,5 + 1%Pu-239	350/410	590/895
16	0,6	4,0 + 1%Pu-239	350/410	590/895
17	0,75	2,5 + 1%Pu-239	260/305	910/1540

18	0,7	3,0 + 1%Pu-239	260/305	910/1540
19	0,65	3,5 + 1%Pu-239	260/305	910/1540
20	0,6	4,0 + 1%Pu-239	260/305	910/1540
21	0,6	4,0 + 1%Pu-239	210/250	950/1650
22	0,75	2,5 + 1%Pu-239	210/250	950/1650
23	0,7	3,0 + 1%Pu-239	210/250	950/1650
24	0,65	3,5 + 1%Pu-239	210/250	950/1650

### Контрольные вопросы:

1. Что такое коэффициент воспроизводства? Первичное и вторичное ядерное топливо?
2. Опишите влияние плутония на нейтронно-физические свойства активной зоны
3. Опишите основные проблемы, стоящие на пути замыкания ядерно-топливного цикла

### Аттестация работы:

Работа выполняется в рамках практических занятий в 8 семестре после изучения темы «Выгорание и воспроизводство ядерного топлива». Оценка в баллах не определена. Успешно выполнившие работу могут быть поощрены дополнительными баллами за ПР2

## 3.2 Практические работы семестра 5

### Практическая работа № 1 (ПР1). Теория критических размеров и элементы теории решетки.

**Цель:** проверка знаний студентов по ключевой теме курса.

#### Список задач

1. Какова тепловая мощность, обусловленная спонтанным делением урана, создающим поток нейтронов мощностью  $10^{10}$  н/с?

2. Определить годовой расход урана ВВЭР-1000. Обогащение урана 5%. Принять тепловую мощность равной 3000 МВт.
3. Определить  $K_{\infty}$  в 5% растворе  $UCl_3$  (уран – 235) в легкой воде. Влиянием хлора пренебречь.  $\gamma = 5 \text{ г/см}^3$  ( $\sigma_{a, u-235} = 680 \text{ барн}$ ,  $\sigma_{a, H} = 0,332 \text{ барн}$ ,  $\sigma_{a, O} = 20,10^{-5} \text{ барн}$ )
4. Определить критический размер реактора в виде куба, содержащего среду с  $K_{\infty} = 1,3$ . Эффективная добавка отражателя  $\delta = 5 \text{ см}$ . площадь миграции  $M^2 = 100 \text{ см}^2$ .
5. Раствор соли урана в воде имеет  $K_{\infty} = 1,4$ . Залитый в бак, имеющий форму куба со стороной 40 см, он образует критическую систему. Как изменится коэффициент размножения, если этот раствор перелить в цилиндрический бак диаметром 40 см с той же высотой. Эффективная добавка отражателя 8 см.
6. Реактор с материальным параметром  $x_H^2 = 0,006 \text{ см}^{-2}$ , имеющий форму куба, работает на тепловой мощности 10 МВт. Какова максимальная удельная мощность в активной зоне?
7. Каков запас реактивности нужно иметь, чтобы разогреть реактор типа ВВЭР с  $20^{\circ}\text{C}$  до  $300^{\circ}\text{C}$ ? (Температурный коэффициент  $-4 \cdot 10^{-4} \text{ 1/град.}$ )
8. Порошок урана-235 и порошок графита образует однородную смесь с соотношением 1:20. Определить минимальную критическую массу урана в такой смеси.  $\gamma_{\text{смеси}} = 1 \text{ г/см}^3$ ,  $\tau = 400 \text{ см}^2$ ,  $\sigma_{s,c} = 5 \text{ барн}$ ,  $\sigma_{g,c} = 0,004 \text{ барн}$ .
9. Определить максимальный коэффициент неравномерности распределения плотности нейтронов потока в параллелепипеда со сторонами a, b, c? В кубе со стороной a?
10. Определить ядерные концентрации нуклидов в гомогенизированной треугольной решетки твэл из  $UO_2$  Диаметр 8 мм в воде. Шаг решетки 13 мм. Плотность  $UO_2$  9,3 г/см<sup>3</sup> плотность воды 1 г/см<sup>3</sup> Обогащение по U-235 5%.
11. Определить ядерные концентрации нуклидов в гомогенизированной квадратной решетки твэл из  $UO_2$  диаметром 8 мм. в воде. Шаг решетки 13 мм. Плотность  $UO_2$  10 г/см<sup>3</sup>, плотность воды 1 г/см<sup>3</sup>. Обогащение по U- 235 5%.
12. Найти коэффициент размножения нейтронов в реакторе, если в первом поколении родилось  $10^{10}$ , а в 4-м поколении  $3,38 \cdot 10^{10}$  нейтронов.
13. Найти минимальное отношение ядерных концентраций Pu-239 / C для обеспечения критичности в бесконечно большой уран-графитовой системе при температуре  $20^{\circ}\text{C}$ . (Значения вероятности избежать резонансного захвата и коэффициент размножения на быстрых нейтронах принять равными 1).
14. Пусть требуется построить однородный на основе смеси U-235 и Be сферический реактор без отражателя радиусом 50 см. какое отношение количеств U-235 и Be нужно взять, чтобы реактор стал критическим. (Значения вероятности избежать резонансного захвата и коэффициент размножения на быстрых нейтронах принять равными 1). Принять  $L_{Be}^2 = 560 \text{ см}^2$ ,  $\tau_{Be} = 98 \text{ см}^2$ .

15 Стержень из  $B_4C_{\text{сст}}$  ( $\gamma=2 \text{ г/см}^3$ ) объемом 0,1 л помещен в бак с холодной водой объемом 10 л. На стержень падает поток тепловых нейтронов с плотностью  $10^{11} \text{ 1/см}^2 \cdot \text{с}$ . На сколько возрастет температура воды в баке за 10 мин.? (Энергия реакции  $B^{10}(n, \alpha)$  равна 2,8 МэВ, сечение поглощения  $B^{10}$  4000 барн.

16. Твэл, который имел при облучении в реакторе мощность 10 кВт извлекается из реактора и помещается для охлаждения в бак с холодной водой объемом 10 л. На сколько градусов нагреется вода в баке за 1 час.

### **Варианты заданий на практическую работу:**

1. Задачи 1, 5, 16

2. Задачи 2, 6, 11

3. Задачи 10, 3, 14

4. Задачи 11, 4, 12

5. Задачи 1, 13, 4

6. Задачи 2, 9, 12

7. Задачи 10, 16, 4

8. Задачи 11, 15, 6

**Критерии оценивания и шкала оценки** (максимальное количество баллов – 15 баллов – см. п.2):

За каждую решенную задачу баллы начисляются отдельно. Каждая задача максимально может быть оценена в 5 баллов.

5 баллов – получено верное решение, сделаны необходимые пояснения к решению;

4 балла – получено верное решение, но необходимые пояснения не даны либо в них допущены мелкие неточности;

3 балла – наблюдается правильное решение, неверный ответ получен в результате арифметической ошибки

1-2 балла – задача решена неверно (или не доведена до конца), но попытки решения носят осмысленный характер;

0 баллов – попытки решения задачи отсутствуют или носят неосмысленный характер.



## Практическая работа № 2. Критическая конфигурация реактора с отражателем.

**Цель:** проверка знаний студентов по ключевой теме курса.

Условие

Водо-водяной реактор имеет длину миграции  $40 + x$  см<sup>2</sup> ( $x$  – ваш номер по списку) и коэффициенты формулы 4 сомножителей, равные:

$\rho = 0,65 + 0,004 * x$  – вероятность избежать захвата при замедлении

$\theta = 0,8 - 0,003 * x$  – коэффициент использования тепловых нейтронов

Для <sup>235</sup>U: выход вторичных нейтронов на одно деление  $\nu_f = 2.45$ ,

сечения деления и (n, $\gamma$ ) –  $\sigma_f = 290$  барн,  $\sigma_{n\gamma} = 60$  барн; прочими реакциями на нем пренебречь.

$\epsilon = 1,06$  – коэффициент размножения на быстрых нейтронах

Летаргию тепловых нейтронов в АЗ и отражателе считать равной 15,8.

задание 1. Найти критический диаметр  $D_{кр}$ , если реактор цилиндрический с  $H=0,92D$ .

задание 2. Найти новый Кэф, если реактор заданного состава с только что найденным диаметром  $D=D_{кр}$  окружить водяным отражателем толщиной  $T=20$ см. Плотность воды в АЗ и отражателе принять как в н.у. (0,1 МПа абс., 293 К), микросечения в отражателе принять (барн):

–  $\zeta\sigma_s = 42,5$

–  $\sigma_s = 46$

–  $\sigma_{tr} = 9,5$

–  $\sigma_a = 0,4$

Транспортное макросечение в активной зоне считать равным  $0,9 - 0,002x$  1/см, сечение захвата 0,8 1/см

Для пересдач:

Решить задачу при тех же условиях, но реактор в виде прямоугольной призмы с квадратным основанием стороной  $D_{кр}$  и высотой  $H=0,92D$ .

**Критерии оценивания и шкала оценки** (максимальное количество баллов – 15 баллов – см. п.2):

Задание 1 и задание 2 оцениваются отдельно, соответственно в 7 и 8 баллов.

Результат решения	Баллы за задание 1	Баллы за задание 2
Получено верное решение, сделаны необходимые пояснения к решению	7	8

Получено верное решение, но необходимые пояснения не даны либо в них допущены мелкие неточности	6	6-7
Наблюдается правильное решение, неверный ответ получен в результате арифметической ошибки	5	5
Задача решена неверно (или не доведена до конца), но попытки решения носят осмысленный характер	4	4
Попытки решения задачи отсутствуют или носят неосмысленный характер	0	0

### 3.3 Тесты

#### 3.3.1 Тест рубежный (Т1), 15 баллов

ВНИМАНИЕ! Вопросы, требующие собственноручного ответа, оцениваются в 3 балла; вопросы на выбор правильных вариантов – в 2 балла; простые тестовые – в 1 балл.

1. Изобразите графически и напишите формулу, описывающую спектр замедляющихся нейтронов в непоглощающей среде [3]

2. Как наличие резонансного поглощения влияет на спектр замедляющихся нейтронов? [1]

- А) На резонансных энергиях наблюдаются провалы спектральной плотности
- Б) На резонансных энергиях наблюдаются пики спектральной плотности
- В) Значимое влияние наблюдается только в области тепловых нейтронов
- Г) Влияние пренебрежимо мало

3. Объясните своими словами, что такое самоэкранирование резонанса: [3]

4. Выберите верные свойства возраста нейтронов: [2]

- А) Возраст нейтронов однозначно связан с их энергией
- Б) Возраст тепловых нейтронов ниже, чем возраст замедляющихся нейтронов
- В) Возраст тепловых нейтронов определяется сечениями взаимодействия в тепловой области энергий
- Г) Возраст тепловых нейтронов определяется сечениями взаимодействия в промежуточной области энергий
- Д) Возраст имеет размерность времени
- Е) Если замедляющая способность среды 1 выше, чем у среды 2, то при прочих равных возраст тепловых нейтронов в среде 1 будет ниже

5. Какой нуклид в активной зоне оказывает наибольшее влияние на резонансное поглощение замедляющихся нейтронов? [1]

А) U-235  
В) H-1

Б) U-238  
Г) Pu-239

6. Повышение температуры топлива в реакторе на тепловых нейтронах приведет к: [1]

- А) Вводу положительной реактивности из-за снижения паразитного поглощения в топливе  
Б) Вводу отрицательной реактивности из-за Доплер-эффекта на U-238 и снижения сечений захвата и деления на U-235  
В) результату А или Б, в зависимости от конкретных параметров реактора.

7. Выберите верные утверждения о неравномерности нейтронного поля и энерговыделения [2]

- А) Коэффициент неравномерности – это отношение максимального значения к среднему (плотности потока нейтронов или плотности энерговыделения)  
Б) Коэффициенты неравномерности нейтронного поля и энерговыделения равны между собой  
В) Коэффициент неравномерности в отдельных случаях может принимать значения меньше 1  
Г) Для цилиндрического реактора определяют радиальный, осевой и азимутальный коэффициенты неравномерности  
Д) Для гетерогенных реакторов определяют один из коэффициентов неравномерности как отношение мощности «горячей» ТВС к «средней»  
Е) Коэффициент неравномерности энерговыделения по ТВС определяют как отношение плотности потока нейтронов в «горячем» твэле к ней же в «среднем».

8. Высокая неравномерность энерговыделения плоха тем, что: [1]

- А) Это приводит к тому, что часть топлива выгорает не полностью при предельно выгоревших отдельных ТВС  
Б) Это приводит к тому, что в АЗ одновременно облучаются ТВС разного времени облучения.  
В) Это приводит к накоплению циклической повреждаемости оболочек твэлов

9. Выберите верные утверждения о влиянии отражателя на АЗ [2]

- А) Отражатель реализует механизм диффузионного отражения всем своим объёмом  
Б) Добавление отражателя увеличивает критические размеры АЗ  
В) Добавление отражателя увеличивает эффективные размеры АЗ  
Г) Чем толще отражатель, тем выше его эффективность  
Д) Не имеет смысла делать отражатель толще, чем  $2-3M$ , где  $M$  – длина миграции в нём  
Е) Лучший материал для отражателя – графит

10. Плотность потока нейтронов в плоском отражателе описывается функцией: [1]

- А) Косинус  
Б) Функция Бесселя  $J_0$   
В) Гиперболический синус  
Г) Линейная комбинация функций Бесселя мнимого аргумента

11. Плотность потока нейтронов в активной зоне цилиндрического реактора с отражателем описывается функцией [1]

- А) Косинус
- Б) Функция Бесселя  $J_0$
- В) Гиперболический синус
- Г) Линейная комбинация функций Бесселя мнимого аргумента

12. Выберите верные утверждения про эквивалентный реактор и эффективную добавку [2]

- А) Эквивалентный реактор – это реактор без отражателя, нейтронно-физические свойства и свойства критичности которого соответствуют исходному реактору с отражателем
- Б) Эффективная добавка отражателя определяется разницей между критическими размерами исходного и эквивалентного реакторов
- В) Эквивалентный реактор имеет меньшие размеры, чем активная зона исходного.
- Г) Эффективная добавка отражателя, как правило, выше, чем его физическая толщина.

В ведомость выставляется количество баллов, полученное на тесте, умноженное на 0,75 (округление до ближайшего целого или в пользу студента).

### 3.3.2 Тест за семестр 7 (Т2)

ВНИМАНИЕ! Вопросы, требующие собственноручного ответа, оцениваются в 3 балла; вопросы на выбор правильных вариантов – в 2 балла; простые тестовые – в 1 балл. Общая «стоимость» 30 б.

1. Перечислите стадии нейтронного цикла в ядерном реакторе на тепловых нейтронах [3]

2. Объясните физический смысл понятия «транспортное сечение» [3]

3. Если есть две уран-водных смеси, которые отличаются только обогащением топлива по U-235, то пробег теплового нейтрона будет [1]

- А) больше в смеси с топливом высокого обогащения
- Б) больше в смеси с топливом низкого обогащения
- В) практически одинаков, вне зависимости от обогащения

4. Как наличие резонансного поглощения влияет на спектр замедляющихся нейтронов? [1]

- А) На резонансных энергиях наблюдаются провалы спектральной плотности
- Б) На резонансных энергиях наблюдаются пики спектральной плотности
- В) Значимое влияние наблюдается только в области тепловых нейтронов
- Г) Влияние пренебрежимо мало

5. Какой нуклид в активной зоне оказывает наибольшее влияние на резонансное поглощение замедляющихся нейтронов? [1]

- А) U-235
- Б) U-238

В) H-1

Г) Pu-239

6. Повышение температуры топлива в реакторе на тепловых нейтронах приведет к: [1]

- А) Вводу положительной реактивности из-за снижения паразитного поглощения в топливе
- Б) Вводу отрицательной реактивности из-за Доплер-эффекта на U-238 и снижения сечений захвата и деления на U-235
- В) результату А или Б, в зависимости от конкретных параметров реактора.

7. Выберите верные утверждения о влиянии отражателя на АЗ [2]

- А) Отражатель реализует механизм диффузионного отражения всем своим объёмом
- Б) Добавление отражателя увеличивает критические размеры АЗ
- В) Добавление отражателя увеличивает эффективные размеры АЗ
- Г) Чем толще отражатель, тем выше его эффективность
- Д) Не имеет смысла делать отражатель толще, чем  $2-3M$ , где  $M$  – длина миграции в нём
- Е) Лучший материал для отражателя – графит

8. Выберите верные утверждения про эквивалентный реактор и эффективную добавку [2]

- А) Эквивалентный реактор – это реактор без отражателя, нейтронно-физические свойства и свойства критичности которого соответствуют исходному реактору с отражателем
- Б) Эффективная добавка отражателя определяется разницей между критическими размерами исходного и эквивалентного реакторов
- В) Эквивалентный реактор имеет меньшие размеры, чем активная зона исходного.
- Г) Эффективная добавка отражателя, как правило, выше, чем его физическая толщина.

9. Выберите верные утверждения о расчётах методом многих групп [2]

- А) Метод многих групп – это метод, основанный на применении уравнения диффузии
- Б) Большое количество групп улучшает точность описания спектра нейтронов
- В) Метод многих групп можно реализовать только в нейтронно-физическом программном коде
- Г) Источником нейтронов для групп замедляющихся нейтронов служит только увод нейтронов из групп с большими энергиями, чем в рассматриваемой.

10. Объясните понятие спектра свёртки в методе многих групп [3]

11. Гетерогенный реактор – это [1]

- А) Реактор, в котором топливо конструктивно отделено от замедлителя
- Б) Реактор, в котором замедлитель конструктивно отделён от теплоносителя
- В) Любой реактор, кроме аппаратов на расплавах топливных солей
- Г) Реактор, в котором топливо имеет конструктивно выделенную оболочку

12. Реактор ВВЭР-440 – это [1]

- А) гомогенный реактор
- Б) гетерогенный реактор
- В) реактор, не являющийся выражено гомогенным или гетерогенным

13. Поглощение резонансных нейтронов сильнее выражено и сильнее влияет на нейтронный цикл и коэффициент размножения в [1]

- А) Гомогенных реакторах
- Б) Гетерогенных реакторах с тесной решёткой
- В) Гетерогенных реакторах с разреженной решёткой

14. Размножение на быстрых нейтронах сильнее выражено и сильнее влияет на нейтронный цикл и коэффициент размножения в [1]

- А) Гомогенных реакторах
- Б) Гетерогенных реакторах с тесной решёткой
- В) Гетерогенных реакторах с разреженной решёткой

15. Плотность потока тепловых нейтронов выше в [1]

- А) Топливе
- Б) Замедлителе

16. (продолжение вопроса 15) Каким численным показателем описывается это явление? Напишите наименование и формулу для этого показателя [3]

17. (продолжение вопроса 16) При росте этого показателя коэффициент использования тепловых нейтронов [1]

- А) растёт
- Б) падает

18. Ячейка состоит из уранового твэла площадью сечения  $A_U$  и воды с площадью сечения  $A_v$ . Микросечения захвата соответственно  $\sigma_U$  и  $\sigma_v$ . Плотность топлива  $\gamma_U$ , плотность воды  $\gamma_v$ . Запишите формулу для расчёта макросечения захвата гомогенизированной ячейки [2]

В ведомость выставляется количество баллов, полученное на тесте, умноженное на 0,5 (округление в пользу студента).

### 3.4 Задания для проведения зачета.

Экзамен по дисциплине «Физика ядерных реакторов» проводится в письменной форме. Подготовка к экзамену осуществляется по приведенным ниже вопросам.

#### Полный перечень вопросов по дисциплине «Физика ядерных реакторов»

1. Понятия: спектр нейтронов, плотность нейтронов, плотность потока нейтронов, плотность тока нейтронов (ток нейтронов). Флюенс. Скорость реакции данного вида. Плотность реакции данного вида (плотность замедления, деления и т.п.) нейтронов.
2. Понятия: микро- и макроскопическое сечения. Длина свободного пробега нейтронов.
3. Сырьевая база современной ядерной энергетики. Сырьевые (пороговые) нуклиды. Топливные (делящиеся) нуклиды. Возможные составляющие активной зоны ядерного реактора (ЯР).
4. Понятия: тепловые нейтроны, диффузионное приближение. Спектр тепловых нейтронов
5. Уравнение диффузии тепловых нейтронов для размножающей и не размножающей сред.
6. Зависимость нейтронных сечений от энергии. Сечения деления, поглощения, рассеяния основных компонентов активных зон реакторов. Преимущества реакторов на тепловых нейтронах.
7. Кинематика столкновений. Зависимость потери энергии от угла рассеяния и массового числа. Минимальная и максимальная потеря энергии. Ступенька замедления. Функция распределения рассеянного нейтрона по энергии в пределах ступеньки замедления.
8. Среднелогарифмическая потеря энергии в одном столкновении. Летаргия. Число столкновений до замедления.
9. Уравнение замедления нейтронов в бесконечной среде. Энергетическое распределение замедляющихся нейтронов в бесконечной однородной поглощающей среде для легких ядер (водорода). Спектр Ферми.
10. Уравнение замедления нейтронов в бесконечной среде. Энергетическое распределение замедляющихся нейтронов в бесконечной однородной поглощающей среде для ядер с  $A > 1$  и смеси ядер. Спектр Ферми.
11. Замедление с поглощением. Вероятность избежать захвата при замедлении.
12. Модель непрерывного замедления. Уравнение замедления в диффузионном приближении и диффузионно-возрастном приближении. Возраст нейтронов. Уравнение возраста.

13. Время замедления и время диффузии нейтронов. Мгновенные и запаздывающие нейтроны. Время жизни поколения.
14. Нейтронный цикл в ядерном реакторе. Формула четырех сомножителей. Эффективный коэффициент размножения нейтронов для бесконечной и конечной сред.
15. Требования, предъявляемые к замедлителям, нейтронно-физические и другие свойства замедлителей ( $H_2O$ ,  $D_2O$ , C). Достоинства и недостатки применяемых замедлителей..
16. Требования, предъявляемые к теплоносителям, и нейтронно-физические и другие свойства теплоносителей (2-3 теплоносителя по выбору:  $H_2O$ ,  $D_2O$ , Na, K, Li, Pb+Bi,  $CO_2$ , Ar, He,  $N_2$ , воздух). Достоинства и недостатки применяемых теплоносителей.
17. Утечка нейтронов. Вероятность избежать утечки при замедлении. Вероятность избежать утечки при диффузии. Влияние изменения линейных размеров гомогенного ядерного реактора на  $K_{эф}$  и реактивность.
18. Коэффициенты формулы четырех сомножителей для гомо- и гетерогенного ядерного реактора. Коэффициент использования тепловых нейтронов для гомо- и гетерогенного ЯР.
19. Физические особенности гетерогенных ядерных реакторов. Влияние соотношения «замедлитель-топливо» соотношения на внешний и внутренний блок-эффекты и на эффективный коэффициент размножения нейтронов в ядерном реакторе. Количественные характеристики блок-эффектов.
20. Общая методика решения диф. уравнения диффузии для активной зоны ядерного реактора. Условие критичности для гомогенного голого ядерного реактора конечных размеров. Материальный и геометрический параметры.
21. Условие критичности реактора в диффузионно-возрастном приближении. Длина миграции
22. Критические размеры гомогенных голых реакторов различной геометрии, их геометрические параметры, распределение плотности потока нейтронов (сфера, параллелепипед, цилиндр).
23. Критическая масса и критический объем. Минимальный критобъем гомогенного голого реактора различной геометрии. Коэффициенты неравномерности нейтронного потока для гомогенного голого реактора конечных размеров различной геометрии (сфера, параллелепипед, цилиндр).



24. Функции отражателя. Эквивалентный реактор. Эффективная добавка отражателя. Тонкий и толстый отражатель, бесконечно толстый отражатель.
25. Гомогенный реактор с отражателем в однокрупном приближении. Методика получения условия критичности.
26. Гомогенный реактор с отражателем в двухкрупном приближении. Постановка задачи и результаты расчета.
27. Коэффициенты неравномерности поля энерговыделения в ядерном реакторе и способы их уменьшения. Физическое профилирование.
28. Уран-ториевый топливный цикл. Нейтронно-физические характеристики U-233, U-235, Th-232. Проблема «отравления» топлива U-232.
29. Уран-плутониевый топливный цикл. Нейтронно-физические характеристики U-235, U-238, Pu-239, Pu-240. Особенности эксплуатации ЯЭР на МОХ-топливе
30. Нейтронно-физические свойства поглотителей: В-10, Gd, Хе-135, Sm-149, Ер. Применение каждого из этих нуклидов.
31. Метод многих групп. Выбор числа групп. Подготовка групповых констант. Многокрупное уравнение для плотности потока нейтронов, смысл его слагаемых и методика решения.
32. сопровождения эксплуатации на АЭС с реакторами ВВЭР-1000. Программы расчета реакторов и реакторных ячеек на ЭВМ (обзорно).
33. Температурные эффекты в реакторе. Зависимость от температуры параметров в формуле 4-х сомножителей.
34. Реактивность. Эффекты реактивности. ТЭР и ТКР по замедлителю и топливу, порядки их величин. Виды кривых ТЭР реакторов, их достоинства и недостатки. Запас реактивности. Требования ядерной безопасности.
35. Эффект Доплера. Мощностной и температурный эффекты реактивности, их проявление и величины. Барометрический и паровой эффект реактивности, их проявление и величины. Требования ядерной безопасности.
36. Нейтронно-физические особенности водо-водяных энергетических реакторов (ВВЭР). Общие вопросы
37. Нейтронно-физические особенности водо-водяных энергетических реакторов (ВВЭР). Борная компенсация и её влияние на ядерную безопасность.

**На экзамене студентам предлагаются к решению задачи, подобные задачам для практической работы № 1.**

## Критерии оценки экзамена.

Критерии оценки знаний по дисциплине:

35-40 баллов - теоретическое содержание курса освоено полностью, без пробелов, необходимые практические навыки работы с освоенным материалом сформированы, все предусмотренные программой обучения учебные задания выполнены, качество их выполнения оценено числом баллов, близким к максимальному.

30-34 балла - теоретическое содержание курса освоено полностью, без пробелов, необходимые практические навыки работы с освоенным материалом в основном сформированы, все предусмотренные программой обучения учебные задания выполнены, качество выполнения большинства из них оценено числом баллов, близким к максимальному.

25-29 баллов - теоретическое содержание курса освоено полностью, без пробелов, некоторые практические навыки работы с освоенным материалом сформированы недостаточно, все предусмотренные программой обучения учебные задания выполнены, качество выполнения ни одного из них не оценено минимальным числом баллов, некоторые виды заданий выполнены с ошибками.

20-24 баллов - теоретическое содержание курса освоено частично, но пробелы не носят существенного характера, необходимые практические навыки работы с освоенным материалом в основном сформированы, большинство предусмотренных программой обучения учебных заданий выполнено, некоторые из выполненных заданий, возможно, содержат ошибки.

Менее 20 баллов - теоретическое содержание курса освоено частично, необходимые практические навыки работы не сформированы, большинство предусмотренных программой обучения учебных заданий не выполнено, либо качество их выполнения оценено числом баллов, близким к минимальному; при дополнительной самостоятельной работе над материалом курса возможно повышение качества выполнения учебных заданий.

Итоговая сумма баллов	Оценка по 4-бальной шкале	Отметка о зачете	Оценка ECTS	Градация
35-40	отлично	зачтено	A	отлично
30-34	хорошо		B	очень хорошо
25-29			C	хорошо
22-24			D	удовлетворительно
20-21			удовлетворительно	E
15-19	F			неудовлетворительно
ниже 15	неудовлетворительно	не зачтено	F	неудовлетворительно