

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
**Саровский физико-технический институт -**  
филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего  
образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
**(СарФТИ НИЯУ МИФИ)**

УТВЕРЖДАЮ  
Декан физико-технического факультета  
СарФТИ НИЯУ МИФИ  
\_\_\_\_\_ А.К. Чернышев  
«    » \_\_\_\_\_ 2021 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**

**Ядерные реакторы**

(наименование дисциплины)

Направление подготовки (специальность) 03.04.01 Прикладные математика и физика

Профиль подготовки Физика фундаментальных взаимодействий

Квалификация (степень) выпускника магистр

(бакалавр, магистр, специалист)

Форма обучения очная

очная

(очная, очно-заочная (вечерняя), заочная)

Автор \_\_\_\_\_ к.ф.-м.н. С.В.Воронцов

Рецензент \_\_\_\_\_ д.ф.-м.н. Ю.Я.Нефедов

**Согласовано:**

Зав. кафедрой ЯРФ \_\_\_\_\_ д.ф.-м.н. Н.В. Завьялов

Руководитель ОПП \_\_\_\_\_ д.ф.-м.н. Н.В. Завьялов

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО и ОС НИЯУ МИФИ (актуализи-  
рован Ученым советом университета, Протокол №21/11 от 27.07.2021 г)

Программа одобрена  
на заседании кафедры Ядерной и радиационной физики  
от 31.08.21 (протокол №2).

г. Саров, 2021 г.

## 1 ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

*Цель изучения дисциплины* – формирование у будущих специалистов современных знаний в области физики ядерных реакторов, ядерной безопасности и, в частности, физики импульсных ядерных реакторов.

*Задачи дисциплины:*

- представление общей информации по физике реакторов, современным и проектируемым энергетическим и исследовательским реакторам;
- описание физических основ работы ядерных реакторов, методов измерения их характеристик, оригинальных физических исследований, проводимых с их использованием;
- освещение вопросов обеспечения ядерной и радиационной безопасности при работах на ядерных реакторах;
- демонстрация импульсных ядерных реакторов РФЯЦ-ВНИИЭФ.

## 2 МЕСТО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВО

Курс «Ядерные реакторы» читается в 1-ом и 2-ом семестрах обучения по ООП магистратуры.

Курс дает представление студентам об общих принципах работы ядерных реакторов и о специфических особенностях импульсных ядерных реакторов, о мерах по обеспечению безопасной эксплуатации реакторов, об общих принципах обеспечения ядерной безопасности, а также знакомит их с ядерными реакторами, работающими в РФЯЦ-ВНИИЭФ. Курс базируется на следующих дисциплинах: Физика атомного ядра и элементарных частиц, СПЕ: взаимодействие излучения с веществом, Ядерная электроника.

## 2 КОМПЕТЕНЦИИ СТУДЕНТА, ФОРМИРУЕМЫЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ. ОЖИДАЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАЗОВАНИЯ, КОМПЕТЕНЦИИ СТУДЕНТА ПО ЗАВЕРШЕНИЮ ОСВОЕНИЯ ПРОГРАММЫ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Курс «Ядерные реакторы» направлен на формирование следующих **компетенций магистра**:

**УК-1** - Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий

**ПК-2** - Способен критически оценивать применяемые методики и методы исследования

**ПК-13.1** - Способен к обеспечению безопасности при проведении работ на ядерно-физических и электрофизических установках, с делящимися материалами, радиоактивными веществами и радиоактивными отходами

**ПК-13.2** - Способен к проведению испытаний согласно техническим требованиям, анализу характеристик испытываемого изделия, а также к подготовке аналитической документации испытаний

В результате изучения дисциплины студент должен:

### Знать

3-УК-1 Знать: методы системного и критического анализа; методики разработки стратегии действий для выявления и решения проблемной ситуации

3-ПК-2 Знать методики оценки и выбора методов исследования

3-ПК-13.1 федеральные нормы и правила, отраслевые нормативные документы по ядерной и радиационной безопасности, электробезопасности и охране труда при эксплуатации исследовательских ядерных и электрофизических установок – источников излучения, высоковольтного и измерительного оборудования; технические характеристики установок и оборудования; технологические регламенты безопасной эксплуатации установок и оборудования

3-ПК-13.2 Метрологию, стандартизацию и сертификацию в атомной отрасли, методы и средства автоматизации выполнения испытаний; порядок разработки и оформления технологической,

методической документации для подготовки и проведения испытаний, отчетной документации по результатам выполненных исследований

В том числе:

- физические основы работы ядерных реакторов;
- основные типы энергетических реакторов;
- основные типы и область применения исследовательских реакторов;
- физические основы работы импульсных ядерных реакторов;
- основные типы и область применения импульсных реакторов;
- физические основы ядерной безопасности;
- принципы проведения критмассовых экспериментов.

Уметь:

У-УК-1 Уметь: применять методы системного подхода и критического анализа проблемных ситуаций; разрабатывать стратегию действий, принимать конкретные решения для ее реализации

У-ПК-2 Уметь критически оценивать применяемые методики и методы исследования

У-ПК-13.1 анализировать научно-техническую информацию по теме исследований, в том числе для организации контроля за техническим состоянием установок и оборудования; средств измерений, контроля, управления и автоматики, обеспечивающих безопасную эксплуатацию установок и стендов

У-ПК-13.2 Оценивать научно-технический уровень достигнутых результатов

В том числе:

- оценить критические параметры гомогенной активной зоны ядерного реактора, имеющей простую геометрию;
- определить категорию происшествия на ядерно-опасном объекте в соответствии с Международной шкалой ядерных событий;
- представлять результаты аналитической и следовательской работы в виде выступления, доклада, информационного обзора.

Владеть:

В-УК-1 Владеть: методологией системного и критического анализа проблемных ситуаций; методиками постановки цели, определения способов ее достижения, разработки стратегий действий

В-ПК-2 Владеть навыками оценки методов исследования по выбранным критериям.

В-ПК-13.1 навыками разработки планов перспективных исследований по инновационным ядерным технологиям и мероприятий по обеспечению ядерной безопасности планируемых работ

В-ПК-13.2 навыками анализа и обобщения результатов выполненных научно-технических исследований и разработок, включая разработку методик выполнения измерений, испытаний и контроля работоспособности основных подсистем и узлов испытательного оборудования и применяемых средств измерений; а также анализ результатов, полученных в результате испытаний изделий (объектов испытания)

В том числе:

- терминологией в области физики ядерных реакторов и ядерной безопасности;
- практическими приемами решения задач в физики ядерных реакторов и ядерной безопасности;
- навыками применения полученной информации при оценке параметров активной зоны, либо содержащей делящийся материал размножающей системы;
- навыками работы с научно-методической литературой, самостоятельной работы, самоорганизации и организации выполнения заданий.

### **3 СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

Общая трудоемкость дисциплины составляет 180 а.ч. за 2 семестра, из них .64 а.ч - аудиторная работа, 44 а.ч. – СРС. Занятия в интерактивной форме обучения - 16 часов за год.

1 семестр: 16 ч – лекции, 16 ч – практические занятия, в том числе 8 а.ч. в ИФ, 40 а.ч. – СРС;

2 семестр : 16 ч – лекции, 16 ч – практические занятия, в том числе 8 а.ч. в ИФ, 40 а.ч. – СРС

### 3.1 СТРУКТУРА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

#### 1 СЕМЕСТР

Раздел учебной дисциплины	Недели	Виды учебной деятельности, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (АЧ)			Текущий контроль успеваемости (неделя, форма)	Аттестация раздела (неделя, форма)	Максимальный балл за раздел
		Лекции	Практ. занятия/ семинары	Самостоятельная работа			
<b>Глава 1 Физика ядерных реакторов</b>					УО, КР, Д, Т, З		
Тема 1.1 Что такое ядерный реактор (вводная лекция)	1	1				зачет (17 неделя)	
Тема 1.2 Взаимодействие с ядрами нейтронов различных энергий	1	1		2		зачет (17 неделя)	
Тема 1.3 Замедление нейтронов	2	1	1	1		зачет (17 неделя)	
Тема 1.4 Деление тяжёлых ядер	3	1	1	2	дискуссия	зачет (17 неделя)	2
Тема 1.5 Диффузия моно-энергетических нейтронов	4	1	1	1		зачет (17 неделя)	
Тема 1.6 Диффузия замедляющихся нейтронов. Теория возраста Ферми	5	1	1	1		зачет (17 неделя)	
Тема 1.7 Коэффициент размножения нейтронов в бесконечной среде.	6	1	1	1		зачет (17 неделя)	
Тема 1.8 Критическое состояние реактора	7	1	1	1		зачет (17 неделя)	
Тема 1.9 Критические размеры активной зоны (АЗ) реактора различной геометрической формы	8	1	1	2	дискуссия	зачет (17 неделя)	2
Контрольная работа	9		1	3	Контрольная работа (разделы 1.1-1.9)		15
Тема 1.10 Физика некритического реактора	9	1		1		зачет (17 неделя)	
Тема 1.11 Физический пуск и обеспечение работы реактора	10		2	2	дискуссия	Тест, зачет (17 неделя)	2
Тема 1.12 Отравление и шлакование ядерного реактора	11	1	1	1		зачет (17 неделя)	
Тема 1.13 Воспроизводство ядерного топлива	12	1	1	1		зачет (17 неделя)	
Тема 1.14 Температурные коэффициенты реактивности	13	1	1	1		зачет (17 неделя)	
<b>Глава 2 Энергетические и исследовательские реакторы со стационарным потоком</b>					УО, КР, Д, Т, З		

Тема 2.1 Добыча, переработка, обогащение урана и изготовления ядерного топлива	14	1	1	2	дискуссия	зачет (17 неделя)	2
Тема 2.2 Энергетические ядерные реакторы	15	1	1	2	дискуссия	зачет (17 неделя)	2
Тема 2.3 Исследовательские ядерные реакторы Тема 2.4 Применение исследовательских реакторов в ядерной медицине	16	1	1	6	Итоговое тестирование	зачет (17 неделя)	20
Зачет	17			10	Зачет по билетам		50
<b>Итоги за семестр</b>		16	16	40			
<b>Бально-рейтинговая система</b>							
<b>Работа в семестре:</b>							50
Посещаемость	1-16						5
Участие в дискуссии	3,8, 10, 14,15						10
Контрольная работа	9						15
Итоговое тестирование	16						20
<b>Зачёт</b>	17						50
<b>ИТОГО</b>							100

## 2 СЕМЕСТР

Раздел учебной дисциплины	Недели	Виды учебной деятельности, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (АЧ)			Текущий контроль успеваемости (неделя, форма)	Аттестация раздела (неделя, форма)	Максимальный балл за раздел
		Лекции	Практ. занятия/ семинары	Самостоятельная работа			
<b>3 Ядерная и радиационная безопасность</b>					УО, Р, Д, Т, Э		
3.1 Физические основы ядерной безопасности (ЯБ)	1,2	4				экзамен	
3.2 Обеспечение ЯБ при хранении и транспортировке делящихся материалов (ДМ)	3,4	4		2		экзамен	
3.3 Критические параметры систем, содержащих нуклиды актиноидной группы элементов	5	1	1	2		экзамен	
3.4 Особенности протекания самоподдерживающейся цепной реакции (СЦР)	6	1	1	2		экзамен	
3.5 Источники нейтронов и гамма-квантов в реакторе	7		2	2	дискуссия	экзамен	2

3.6. Биологическое действие ионизирующих излучений. Основные определения радиационной техники безопасности	8		2	1	дискуссия	экзамен	2
<b>4 Критмассовые исследования</b>					УО, Р, Д, Т, Э		
4.1 Методика и техника проведения критмассовых экспериментов	9	2		1		экзамен	
<b>5 Импульсные реакторы</b>							
5.1 Классификация, принцип действия и история создания импульсных ядерных реакторов (ИЯР)	10	2		1		экзамен	
5.2 Классификация, принцип действия и история создания ИЯР самогасящегося (аперидического) действия - АИР	11	1		1		экзамен	
5.3 Кинетика АИР							
5.4 Определение параметров АИР	11	1		1		экзамен	
Реферат	12, 13		4	6	Защита реферата		15
5.5 АИР ВНИИЭФ и их использование для проведения научных исследований	14		2	2	дискуссия	экзамен (18 неделя)	2
<b>6 Международная шкала ядерных событий</b>							
6.1 Международная шкала ядерных событий	15		2	2	дискуссия	экзамен	2
6.2 Обзор ядерных аварий	16		2	2	дискуссия	экзамен	2
Итоговое тестирование	17			5	Тестирование		20
Экзамен				10			50
<b>Итоги за семестр</b>		16	16	40			
<b>Работа в семестре:</b>							50
Посещаемость	1-16						5
Участие в дискуссии	7,8 14,15 16						10
Реферат	12,13						15

Итоговое тестирование	17						20
Экзамен							50
							100

### 3.2. СОДЕРЖАНИЕ РАЗДЕЛОВ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

#### КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

##### Раздел 1. Физика ядерных реакторов

##### Тема 1.1 Что такое ядерный реактор. (Вводная лекция.)

Определение ЯР: устройство для осуществления управляемой ядерной цепной реакции деления.

Принцип действия ЯР. Цепной процесс, основанный на реакции деления ядер. Коэффициент размножения (отношение числа нейтронов в последующем поколении к числу нейтронов в предыдущем поколении). Конкурирующие с размножением нейтронов процессы: поглощение нейтронов без деления и утечка нейтронов. Состояния реактора: подкритическое ( $K < 1$ ), надкритическое ( $K > 1$ ), критическое ( $K = 1$ ). Способы создания ЯР: обогащение топлива, замедление нейтронов.

История развития ЯР. Открытие деления  $U^{235}$  (Опыты О. Гана, статья Л. Майтнер и О. Фриша, опыты Л. Сцилларда и У. Цини). Первый в мире реактор Э. Ферми Chicago Pile-1 (декабрь 1942). Первая контролируемая цепная реакция делений на мгновенных нейтронах (сборка "The Dragon", январь 1945). Первый советский реактор Ф-1 (25 декабря 1946). Незапланированный разгон на мгновенных нейтронах "голой" урановой сборки "Jemima" (Лос-Аламос, 1952) - начало разработки импульсных реакторов на мгновенных нейтронах. Первая в мире АЭС (27 июня 1954, Обнинск). Природный реактор в Габоне.

Классификация ЯР. По режиму работы: статические (работающие на заданном уровне мощности) и импульсные (генерирующие импульсы делений). По назначению: исследовательские, энергетические, размножители, для наработки изотопов. По конфигурации АЗ: гомогенные и гетерогенные. По энергии нейтронов: на тепловых нейтронах, на промежуточных нейтронах, на быстрых нейтронах. По компоновке АЗ: корпусные и каналные. Классификация энергетических реакторов на тепловых нейтронах по типу замедлителя: реакторы на легкой воде (замедлитель - вода), тяжеловодные реакторы (замедлитель - тяжелая вода), уран-графитовые реакторы (замедлитель - графит).

Топливные циклы. Уран-плутониевый и уран-ториевый топливные циклы.

Перспективные реакторные разработки. Высокотемпературный газоохлаждаемый реактор. Подкритический реактор, управляемый ускорителем. Реакторы для «малой» энергетики.

##### Тема 1.2. Взаимодействие с ядрами нейтронов различных энергий.

Ядерные реакции. Определение. Схема записи. Закономерности протекания. Механизм составного ядра. Ядерное эффективное (микроскопическое) сечение: Макроскопическое сечение (линейный коэффициент ослабления). Связь макроскопического сечения  $\Sigma$  со скоростью реакций в единице объема  $v$  ( $v = \Phi \cdot \Sigma$ , где  $\Phi$  - поток нейтронов) и со средней длиной пути нейтрона до взаимодействия  $l$  ( $l = 1/\Sigma$ ).

Нейтроны. Рассеяние и реакции. Свойства нейтрона Потенциальное (без образования составного ядра) и резонансное рассеяние. Упругое (с сохранением кинетической энергии системы "ядро + нейтрон") и неупругое рассеяние. Радиационный захват (реакция  $(n, \gamma)$ ). Реакция деления (реакция  $(n, f)$ ).

Возбужденные состояния ядер. Энергетические спектры легких и тяжелых ядер. Первый энергетический уровень. Энергия сплошного спектра. Условия образования составного ядра (энергетические и спиновые соотношения). Время жизни энергетических уровней. Взаимодей-

ствии нейтрона с ядрами через составное ядро. Формула Брейта-Вигнера. Параметры резонансов. Закон “ $1/V$ ” для микроскопических сечений.

Энергетические области. Быстрые нейтроны (от  $\sim 10$  МэВ до 0,1 МэВ, верхняя граница определяется максимальной энергией нейтронов деления), промежуточные (от 0,1 МэВ до  $\sim 0,2$  эВ) и тепловые (с энергии  $\sim 0,2$  эВ, которая определяется равенством энергетического распределения тепловых (распределением Максвелла) и замедляющихся (“спектр Ферми” или “ $1/E$ ”) нейтронов).

Зависимость сечения взаимодействия от энергии. Зависимости различных сечений взаимодействия (сечения реакций  $(n,n)$ ,  $(n,n')$ ,  $(n,\gamma)$ ,  $(n,f)$ ) от энергии нейтронов и типов ядер. Резонансный характер сечений взаимодействия в промежуточной области энергий. Значительный рост сечения деления делящихся изотопов в тепловой области. Пороговый характер сечения для делимых изотопов. Пороговый характер сечения неупругого рассеяния  $(n,n')$ . Уменьшение сечения реакции радиационного захвата в быстрой области. Относительное постоянство сечения упругого рассеяния.

### **Тема 1.3. Замедление нейтронов.**

Цель: значительное увеличение сечения деления на тепловых нейтронах, что дает возможность создать реактор на природном или слабо обогащенном уране.

Механизм замедления. Необходимость уменьшения энергии в  $\sim 10^8$  раз (с  $\sim 2$  МэВ до 0,025 эВ). Эффективность неупругого рассеяния. Пороговый характер реакции  $(n,n')$ . Определяющий вклад упругого рассеяния. Акт рассеяния (в лабораторной системе и в системе центра инерции (СЦИ)). Отношение энергий до и после. Средний косинус угла рассеяния. Потеря энергии при одном столкновении. Средняя логарифмическая потеря энергии.

Замедлители. Замедлитель должен эффективно замедлять нейтроны и слабо их поглощать. Характеристики замедлителей: замедляющая способность и коэффициент замедления. Наиболее эффективные замедлители.

Спектр замедляющихся нейтронов. Имеет вид “ $1/E$ ” и называется спектр Ферми. Учет поглощения - вероятность избежать резонансного захвата. Резонансные интегралы: эффективный и истинный.

### **Тема 1.4. Деление тяжёлых ядер.**

Возможность процесса деления. Открытие деления ядер урана. Зависимость энергии связи нуклона в ядре от числа нуклонов. Энергетический барьер для реакции деления. Способы возбуждения ядра. Уникальность процесса деления под действием нейтронов (возможность получения самоподдерживающейся цепной реакции (СЦР)). Спонтанное деление ядер. Характеристики процесса спонтанного деления для различных нуклидов.

Делимые и делящиеся нуклиды. Энергия связи нейтрона при поглощении его ядрами с четным и нечетным числом нейтронов. Соотношение энергии возбуждения и порогом реакции деления. Делящиеся нуклиды (делятся нейтронами любых энергий). Делимые или “пороговые” нуклиды (делятся только нейтронами, кинетическая энергия которых больше определенного значения). Ядерное сырье.

Механизм деления. Капельная модель деления ядра. Примеры типичных реакций деления. Энергия деления (энергия осколков деления, мгновенных нейтронов и гамма-квантов, продуктов  $\beta$ -распада). Обусловленное  $\beta$ -распадом остаточное тепловыделение и связанные с ним опасности.

Продукты деления. Вероятность выхода различных продуктов деления в зависимости от массового числа. Распределение продуктов деления по типам элементов.

Нейтроны деления. Среднее число нейтронов на деление  $\nu$  и зависимость его от энергии нейтронов, обусловивших деление,  $\nu(E)$ . Энергетический спектр Максвелла для нейтронов деления. Мгновенные и запаздывающие нейтроны. Механизм образования запаздывающих нейтронов (ядра-предшественники). Параметры запаздывающих нейтронов. Доля запаздывающих нейтронов. Особая роль запаздывающих нейтронов для управления реактором.

### **Тема 1.5. Диффузия моноэнергетических нейтронов.**

Понятие диффузии. Процесс, определяемый тепловым движением и наличием градиентов концентраций. Аналогичность диффузии нейтронов диффузии в газах. Цель: определение смещения нейтрона и оценка вероятности утечки его из АЗ. Простейший случай - изотропная диффузия.

Вводимые понятия: “средний” нейтрон, длина переноса или транспортная длина  $l_{tr}$  (вводится для случая, когда рассеяние нейтрона не является сферически симметричным).

Диффузионный ток. Вывод выражения для диффузионного тока  $\mathbf{J} = -D \cdot \text{grad}\Phi$ ,  $D$  - коэффициент диффузии.

Уравнения диффузии. Вывод уравнения диффузии на основе баланса нейтронов в произвольном единичном объеме вещества (с учетом рождения, прибыли за счет диффузии и поглощения). Граничные условия уравнения диффузии. Условие обращения потока нейтронов в 0 на границе с пустотой.

Длина диффузии. Уравнение для точечного источника в бесконечной среде. Определение длины диффузии ( $L^2 = D/\Sigma_a$ ). Связь длины диффузии со среднеквадратичным пробегом теплового нейтрона ( $L^2 = 1/(6 \cdot R_{CP}^2)$ ).

### **Тема 1.6. Диффузия замедляющихся нейтронов. Теория возраста Ферми.**

Диффузия замедляющихся нейтронов. (Теория возраста Ферми). Решение уравнения диффузии  $\Phi = \Phi(\mathbf{r}, t)$ , задача: получить для замедляющихся нейтронов решение в виде  $\Phi = \Phi(\mathbf{r}, E)$ .

Модель непрерывного замедления нейтрона. Функция плотности замедления. Вывод уравнения возраста. Возраст нейтрона (величина, аналогичная квадрату длины диффузии). Связь возраста со среднеквадратичным пробегом замедляющегося нейтрона ( $\tau = 1/(6 \cdot R_{CP}^2)$ ).

Длина миграции  $M$  ( $M^2 = L^2 + \tau$ ). Время замедления нейтрона. Время диффузии в тепловой области.

### **Тема 1.7. Коэффициент размножения нейтронов в бесконечной среде.**

Коэффициент размножения нейтронов в бесконечной среде. Нейтронный цикл в реакторе на тепловых нейтронах. Формула четырех сомножителей ( $K_0 = \eta \cdot \theta \cdot \phi \cdot \mu$ ). Коэффициент размножения на быстрых нейтронах  $\mu$ . Вероятность избежать резонансного захвата  $\phi$ . Коэффициент использования тепловых нейтронов  $\theta$ . Число нейтронов на акт поглощения нейтрона в топливе  $\eta$ . Преимущества реактора с гетерогенной АЗ. Оптимальные параметры гомогенной и гетерогенной сред.

### **Тема 1.8. Критическое состояние реактора.**

Критическое уравнение реактора. Влияние утечки на коэффициент размножения. Уравнение диффузии для реактора. Условия получения аналитического решения уравнения диффузии. Аналитическое решение для гомогенного реактора без отражателя. Критическое уравнение. Материальный параметр среды. Вероятность избежать утечки при замедлении. Вероятность избежать утечки при диффузии. Частные случаи гомогенного реактора без отражателя: реактор-параллелепипед (декартова система координат, распределение потока нейтронов по косинусу), реактор-цилиндр (цилиндрическая система координат, распределение потока нейтронов по косинусу и по функции Бесселя), реактор-шар (сферическая система координат, распределение  $\sin R/R$ ). Геометрический параметр реактора. Условие критического состояния реактора (равенство материального и геометрического параметров). Минимальный критический объем АЗ (АЗ в виде куба, равновеликого цилиндра и шара).

Реальная активная зона. Применимость теории критических размеров к реактору с гетерогенной АЗ. Выражения для возраста и длины диффузии нейтронов в размножающей среде (в реакторе). Критическое уравнение реактора для случая малых  $K_{эф}$  ( $K_{эф} \sim 1$ ). Влияние отражателя нейтронов на  $K_{эф}$ . Выгода отражателя. Материалы для отражателей в реакторе. “Бесконечный” отражатель. Альбеда (коэффициент внутреннего отражения).

### **Тема 1.10. Физика не критического реактора.**

Некритический реактор. Избыточный коэффициент размножения нейтронов. Реактивность. Изменение потока нейтронов в некритическом реакторе. Период реактора. Время удвоения мощности для надкритического реактора. Увеличение числа мгновенных нейтронов в надкритическом реакторе. Роль запаздывающих нейтронов в управлении реактором.

Уравнение кинетики реактора. Уравнения баланса для мгновенных и запаздывающих нейтронов. Система уравнений в одноплюсовом приближении. Решение системы и периоды реак-

тора при переходных процессах. Связь реактивности с периодом. Графическая интерпретация. Учет всех 6 групп запаздывающих нейтронов. Характер изменения нейтронного потока в надкритическом и подкритическом реакторе при одинаковом (по абсолютной величине) скачке реактивности.

Реактивность. Реактивность на мгновенных нейтронах. Соотношение шкал общей и мгновенной реактивности. Критическое состояние на мгновенных нейтронах. Единицы измерения реактивности (абсолютные единицы, проценты, обратные часы, единицы  $\beta\epsilon\phi$  или \$).

### **Тема 1.11. Физический пуск и обеспечение работы реактора.**

Размножение нейтронов постоянно действующего источника в подкритическом реакторе. Приближение к критическому состоянию и физический пуск реактора. Энергетический пуск и вывод реактора на мощность. Снижение реактивности (выгорание топлива, образование шлаков в реакторе). Выгорание. Связь выгорания с количеством образовавшихся продуктов деления. Работоспособность тепловыделяющих элементов. Допустимая глубина выгорания. Кампания реактора. Система управления и защиты (СУЗ) реактора: система компенсации реактивности, регулирующие стержни, аварийные стержни.

### **Тема 1.12. Отравление и шлакование реактора.**

Отравление и шлакование реактора. (Поглощение нейтронов короткоживущими ядрами осколков деления называется отравлением. Реактивность, потерянная при отравлении, быстро восстанавливается при радиоактивном распаде ядер отравляющего вещества. Образование долгоживущих и стабильных продуктов деления - шлаков называется зашлаковыванием. После остановки реактора поглощающая способность шлаков практически не изменяется, а потери в реактивности - не восстанавливаются).

Отравление реактора изотопом  $^{135}\text{Xe}$ . Ксенон как наиболее вредный из образующихся шлаков. Процесс образования  $^{135}\text{Xe}$  в реакторе. Выход ксенона. Равновесная и предельная концентрации  $^{135}\text{Xe}$  и его предшественника  $^{135}\text{I}$ . Нарушение соотношения соответствующих периодам полураспада концентраций ксенона и йода в работающем реакторе. Отравление реактора (отношение числа паразитных захватов нейтронов в ксеноне-135 к числу захватов в уране). Выражение отравления через предельную концентрацию. Величины отравления для реактора на высокообогащенном и природном уране. Влияние ксенона на реактивность. Связь величины обусловленной образованием ксенона отрицательной реактивности и отравлением.

Влияние  $^{135}\text{Xe}$  на работу реактора. Ксеноновая яма, неустойчивость работы реактора с большим потоком нейтронов, ксеноновые волны.

Шлакование реактора. Классификация шлаков (1-я, 2-я и 3-я группы в зависимости от сечения поглощения нейтронов). Влияние на работу реактора изотопа  $^{149}\text{Sm}$  (определяющая роль изотопа в растворном реакторе в отсутствие  $^{135}\text{Xe}$ ).

### **Тема 1.13. Воспроизводство ядерного топлива.**

Процесс выгорания топлива. Уран-плутониевый топливный цикл. Деление и радиационный захват для  $^{235}\text{U}$ . Содержание  $^{236}\text{U}$  в реакторе. Зависимость сечения радиационного захвата от энергии.

Накопление плутония в реакторе. Схема образования изотопов плутония. Баланс тяжелых ядер в реакторе. Связь концентрации ядер с выгоранием. Коэффициент воспроизводства (конверсии)  $K_B$ . Влияние параметров размножающей среды (концентрация ядер урана, обогащение, вероятность избежать резонансного захвата и т.д.) на величину коэффициента воспроизводства. Максимальное значение  $K_B$  для реакторов на тепловых нейтронах. Невозможность расширенного воспроизводства в реакторах на тепловых нейтронах в уран-плутониевом топливном цикле.

Реакторы на быстрых нейтронах. Преимущества реакторов на быстрых нейтронах для обеспечения расширенного воспроизводства (пренебрежимо малая величина сечения радиационного захвата; возможность деления ядер  $^{238}\text{U}$ ; отсутствие поглощения в замедлителе). Конструкция реакторов. Зона воспроизводства. Достижимые значения  $K_B$ . Недостатки реакторов на быстрых нейтронах (высокое обогащение топлива: 20-25%; жидкометаллический теплоноситель; трехконтурная система теплоотвода; высокие капитальные затраты).

Уран-ториевый топливный цикл. Схема получения  $^{233}\text{U}$  из  $^{232}\text{Th}$ . Возможность реализации расширенного воспроизводства в реакторе на тепловых нейтронах. Преимущества U-Th цикла.

Ядерное топливо. История открытия делящихся элементов. Необходимость производства ядерного топлива. Запасы урана. Добыча и переработка урана. Обогащение урана. Концепция топливного цикла в России.

#### **Тема 1.14. Температурные коэффициенты реактивности**

Температура АЗ. Понятие температурного коэффициента реактивности. Плотностные коэффициенты, геометрические коэффициенты, ядерные коэффициенты. Динамический температурный коэффициент.

### **Раздел 2. Энергетические и исследовательские реакторы со стационарным потоком.**

#### **Тема 2.1. Добыча, переработка, обогащение урана и изготовление реакторного топлива.**

Ядерное топливо. История открытия делящихся элементов. Необходимость производства ядерного топлива. Запасы урана.

Добыча и переработка урана. Добыча урана в шахтах. Первичное отделение пустой породы. Радиометрические контрольные станции. Переработка урана на радиометрических обогатительных фабриках (дробление, грохочение, промывка, радиометрическая сепарация). Переработка урана на гидрометаллургических заводах (дальнейшее дробление и измельчение, выщелачивание, сорбционное извлечение, экстракционная очистка, сушка, прокаливание). Конечный продукт - закись-окись урана  $U_3O_8$ .

Обогащение урана. Технология получения гексафторида урана  $UF_6$ . Газодиффузионный метод обогащения (принцип диффузионного разделения изотопов, история развития метода, технология обогащения). Центробежный метод обогащения (конструкция центрифуги, принцип действия метода, преимущества метода).

Концепция топливного цикла в России. Типы АЭС, эксплуатируемых в России и странах СНГ. Мощности для производства топлива и тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) для ядерно-энергетических установок (ЯЭУ). Регенерация отработавших ТВЭЛ ЯЭУ. Перспективы использования плутония. Смешанное оксидное (МОХ) топливо. Направления и перспективы развития ядерной энергетики в России.

#### **Тема 2.2. Энергетические ядерные реакторы.**

Материалы ядерных реакторов (ЯР). Материалы ТВЭЛ. Замедлители ЯР. Теплоносители ЯР. Конструкционные материалы. Биологическая защита.

Классификация и типы энергетических реакторов. Классификация энергетических реакторов. Графитовые реакторы с отводом тепла водой (реактор Первой в мире АЭС; реактор Белоярской АЭС; реакторы большой мощности кипящие (РБМК)). Графитовые реакторы с газовым охлаждением ("магноксвые" ЯР (GCR); усовершенствованные газоохлаждаемые ЯР (AGR)). Легководные (LWR) ЯР (Водо-водяные энергетические реакторы (ВВЭР); реакторы с водой под давлением (PWR), реакторы на кипящей воде (BWR)). Тяжеловодные ЯР (CANDU). Реакторы на быстрых нейтронах (реакторы типа БН: БН-600, БН-800; реактор MONJU, реактор SUPERPHENIX).

Развитие энергетических ЯР. Показатели безопасной эксплуатации АЭС. Поколения АЭС (по принципиальному конструктивному решению). Примеры ЯР для АЭС 2-го, 3-го и 4-го поколений. Перспективные разработки: высокотемпературный ЯР с гелиевым охлаждением (ВТГР), управляемый ускорителем подкритический реактор (проект К. Рубиа), проект «Прорыв».

#### **Тема 2.3. Исследовательские ядерные реакторы.**

Исследовательские реакторы (ИР). История развития (от первого реактора CP-1 до сверхмощного CM-3). Область применения ИР (испытание новых ТВЭЛ и материаловедение, физические исследования, получение изотопов). Классификация (по назначению: для физических исследований, для производства изотопов, материаловедческие, для инженерных испытаний; по потоку нейтронов; по режиму работы: стационарные, импульсные, пульсирующие).

Физические особенности ИР. Реактор как источник нейтронов. Предельное отношение потока нейтронов к мощности реактора. Получение интенсивных потоков тепловых нейтронов в АЗ. Выбор материала и конструкции ИР. Физические особенности ИР с ловушкой нейтронов. Теория пульсирующего реактора.

Физика некоторых исследовательских реакторов. Высокопоточные ИР (СМ-3, JMTR). Петлевые ИР (АТР, МР). Серийные ИР (ИРТ-2000, TRIGA). ИР с нестационарным потоком (ИГР, ИБР, ИИН). Тенденции развития ИР.

### **Раздел 3. Ядерная и радиационная безопасность**

#### **Тема 3.1. Физические основы ядерной безопасности (ЯБ).**

Основные определения ядерной безопасности. Ядерная безопасность (ЯБ). Критическая система. Критическая масса. Критический размер. Минимальный критический размер. Безопасный размер. Внешний коэффициент умножения.

Критическое уравнение реактора и влияние состава среды и геометрических параметров системы на критичность. Число вторичных нейтронов на акт захвата нейтрона в топливе  $\eta$  как один из основных параметров. Влияние формы системы на критичность (опасность приближения формы системы к сферической; опасность увеличения высоты цилиндра и т.д.) Влияние отражателя. Влияние на критичность разбавления делящегося материала различными веществами (разбавление делящихся и делимых нуклидов; зависимость критической массы от степени разбавления, опасность возникновения СЦР при увеличении и уменьшении степени разбавления, минимальная концентрация). Зависимость критических параметров от плотности среды.

#### **Тема 3.2. Основные принципы по обеспечению ЯБ при хранении и транспортировке делящихся материалов.**

Способы обеспечения ЯБ. Ограничение размеров и формы оборудования. Ограничение количества и концентрации делящегося материала (ДМ). Преимущества и недостатки данных способов.

Допустимые и безопасные параметры. Нахождение диаметра бесконечного критического цилиндра и толщины бесконечного критического плоского слоя. Допустимые параметры (при заданной концентрации ДМ). Безопасные параметры (обеспечивают безопасность во всем диапазоне изменения концентрации). Значения безопасного диаметра для цилиндра и безопасной высоты для плоского слоя. Безопасные с точки зрения обеспечения ЯБ контейнеры для ДМ.

Нормативные параметры ЯБ. Норма загрузки, норма накопления и норма концентрации.

Классификация оборудования и транспортных установок. Безопасное оборудование. Опасное оборудование. Оборудование с повышенным коэффициентом запаса. Классы упаковок с ДМ.

Взаимодействие содержащих ДМ систем. Нейтронное взаимодействие в системах, состоящих из подкритических компонент с ДМ. Возможность достижения критичности в совокупности подкритических систем. Способы расчета подобных систем. Снижение нейтронного взаимодействия между отдельными элементами. Защищающий контейнер, его назначение и конструкция.

#### **Тема 3.3. Критические параметры систем, содержащих нуклиды актиноидной группы элементов.**

Возможность образования критического состояния в системах, содержащих нуклиды актиноидной группы. Возможность СЦР для нуклидов актиноидной группы. Минимальные критические массы для делящихся и пороговых нуклидов. Влияние замедлителей на критические параметры нуклидов.

#### **Тема 3.4. Особенности протекания самоподдерживающейся цепной реакции (СЦР).**

Самоподдерживающаяся цепная реакция. Закономерности протекания СЦР. Влияние на протекание СЦР скорости ввода реактивности, механизма гашения, начального фона нейтронов в системе и времени жизни нейтронов. Опасность автокаталитического характера СЦР. Необходимость ограничения последствий СЦР. Радиационные последствия СЦР и значение системы аварийной сигнализации.

#### **Тема 3.5. Источники нейтронов и $\gamma$ -квантов в реакторе.**

Виды ионизирующих излучений и принципы защиты от них. Виды излучений и их проникающая способность. Отличие в проникании заряженных и нейтральных частиц. Определяющая роль потоков нейтронов и  $\gamma$ -квантов. Защита от излучения (биологическая, тепловая, защита оборудования).

Источники нейтронов в реакторе. Мгновенные нейтроны деления (выход и энергетический диапазон). Запаздывающие нейтроны (определяющая опасность от запаздывающих нейтронов в

системах с циркуляцией топлива, а также при перегрузках топлива). Нейтроны активации (основной канал - распад ядер  $^{17}\text{N}$ , образующихся в реакции  $(n,p)$  на ядрах  $^{17}\text{O}$ ). Фотонейтроны (пороги и сечения реакции  $(n,\gamma)$  для ядер  $^2\text{D}$ ,  $^9\text{Be}$ ,  $^{13}\text{C}$ ,  $^6\text{Li}$ ).

Источники  $\gamma$ -квантов. Мгновенные  $\gamma$ -кванты (средняя энергия и выход). Гамма-излучение при распаде короткоживущих и долгоживущих продуктов деления (выход, закономерности спада при неработающем реакторе). Захватное  $\gamma$ -излучение ( $\gamma$ -кванты, образующиеся за счет реакции радиационного захвата  $(\gamma,n)$ , спектры  $\gamma$ -излучения для различных элементов). Гамма-излучение при неупругом рассеянии ( $\gamma$ -кванты пороговой реакции  $(n,p^{\gamma})$ ). Гамма-излучение продуктов реакции нейтронов с образованием заряженных частиц (наиболее значимая реакция  $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ ). Гамма-излучение продуктов активации (активация ядер теплоносителя:  $^{23}\text{Na}$ ,  $^{18}\text{O}$ ,  $^{16}\text{O}$ ; активация ядер присадок в конструкционных материалах,; активация содержащегося в воздухе  $^{40}\text{Ar}$ ). Аннигиляционное излучение (излучение, обусловленное аннигиляцией позитронов и электронов; источники позитронов - ядра  $^{58}\text{Co}$ ,  $^{64}\text{Cu}$ ,  $^{65}\text{Zn}$ , претерпевающие  $\beta^+$ -распад). Тормозное излучение (практический интерес - активация литиевого теплоносителя).

Взаимодействие нейтронов и  $\gamma$ -квантов с веществом. Основные типы взаимодействия нейтронов с веществом. Соотношение потока нейтронов и дозы. Основные типы взаимодействия  $\gamma$ -квантов с веществом. Соотношение потока  $\gamma$ -квантов и дозы.

### **Тема 3.6. Биологическое действие ионизирующих излучений. Основные определения радиационной техники безопасности.**

Основные понятия и термины радиационной техники безопасности (РТБ). Активность. Источники ионизирующего излучения (открытые и закрытые). Дозы: экспозиционная, поглощенная, эквивалентная. Единицы измерения доз. Категории облучаемых лиц. Группы критических органов. Основные дозовые пределы облучения и допустимые уровни.

Организация работ с применением источников ионизирующего излучения. Минимально значимая активность (МЗА). Группы радионуклидов (в зависимости от МЗА). Классы работ. Требования к организации работ по I, II и III классу. Радиоактивные отходы. Средства индивидуальной защиты. Правила личной гигиены.

Биологическое действие ионизирующего излучения. Механизм биологического действия ионизирующих излучений (первичные физико-химические процессы в молекулах живых клеток; нарушение функций организма в целом, как следствие процессов на клеточном уровне). Радиационные эффекты облучения людей. Соматические стохастические и нестохастические эффекты. Генетические эффекты. Клинические формы, степени тяжести и исходы острой лучевой болезни (ОЛБ). Стойкость различных живых организмов к действию ионизирующего излучения.

## **Раздел 4. Критмассовые исследования**

### **Тема 4.1. Методика и техника проведения критмассовых экспериментов.**

История развития критмассовых экспериментов и критических стенов. Понятие размножающей системы. Основные принципы проведения экспериментов и обеспечение ядерной безопасности. Параметры размножающих систем, определяемые в экспериментах. Способы формирования расчетных критических моделей стеновых сборок.

Общие сведения о критических стенов ВНИИЭФ, ВНИИТФ и Лос-Аламосской национальной лаборатории.

## **Раздел 5. Импульсные реакторы**

### **Тема 5.1. Классификация, принцип действия и история создания импульсных ядерных реакторов (ИЯР).**

ИЯР. Определение и характерное отличие ИЯР. Классификация ИЯР (апериодического (самогасящегося) действия, периодического действия (пульсирующие), бустеры). Принцип действия и особенности различных типов ИЯР. История развития ИЯР.

Принцип действия и параметры импульса ИЯР самогасящегося (апериодического) действия (АИР). Принцип действия АИР. Последовательность генерирования вспышки делений. Характер изменения во времени реактивности, мощности и температуры. Форма импульса делений. Влияние запаздывающих нейтронов. Определяющая роль величины исходной надкритичности. Кине-

тика АИР. Расчет параметров импульса. Верхний предел энерговыделения за импульс. Эффект теплового удара. Флуктуация всплеск при слабом источнике нейтронов.

### **Тема 5.2. Классификация, принцип действия и история создания ИЯР самогасящегося (апериодического) действия - АИР.**

Типы АИР и история их развития. АИР на быстрых нейтронах с металлической АЗ (реакторы первого поколения типа Lady Godiva; реакторы второго поколения типа Godiva-IV, БИР и т.д.; способы снижения нагрузок на материал АЗ при генерации импульса). АИР на тепловых нейтронах: бассейновые (TRIGA, АСРР, SPERT), уран-графитовые (TREAT, ИГР), растворные (KEWB, ИИН, ВИР).

Механизмы гашения реактивности в АИР (тепловое расширение материала АЗ, эффект Доплера, образование пустот при вскипании раствора, ядерные эффекты).

Особенности АИР на жидком топливе (спектр нейтронов утечки, простота конструкции, безопасность эксплуатации). Принципы размещения и конструирования реакторов типа ВИР (ВНИИЭФ). Эволюция конструкции корпуса АЗ. Особенности управления реактором. Стабильность топливного раствора. Параметры импульсов делений. Вопросы безопасности. Реакторы ВНИИТФ: ЯГУАР, ИГРИК.

Особенности реакторов с металлической АЗ. Конструкция реакторов типа БР-1, БИР, ГИР, БР-К и экспериментального оборудования. Опыт эксплуатации реакторов. Характеристики импульсов делений. Вопросы безопасности. Предельный случай – реактор РИР. Реакторы, разработанные во ВНИИТФ: типа БАРС.

Особенности реактора БИГР (наличие замедлителя в АЗ и достаточно жесткий спектр нейтронов). Требования к однородности распределения урана в графитовой матрице. Топливо для реактора БИГР. Конструкция реактора. Характеристики импульсов делений. Вопросы безопасности.

### **Тема 5.3. Кинетика АИР**

Принцип действия АИР. Последовательность генерирования всплески делений. Характер изменения во времени реактивности, мощности и температуры. Форма импульса делений. Влияние запаздывающих нейтронов. Определяющая роль величины исходной надкритичности. Кинетика АИР. Расчет параметров импульса. Верхний предел энерговыделения за импульс. Эффект теплового удара. Флуктуация всплеск при слабом источнике нейтронов.

Основные параметры, характеризующие работу реактора и обеспечивающие безопасность: реактивность, мощность, энерговыделение, период разгона, длительность и форма импульса, технологические параметры (температура АЗ, давление в корпусе и др.). Методы измерений.

### **Тема 5.5. АИР ВНИИЭФ и их использование для проведения научных исследований**

Импульсные реакторы являются уникальными установками, позволяющими проводить различные физические исследования.

На реакторе БИГР были проведены (совместно с ОИЯИ) эксперименты по получению ультрахолодных нейтронов. На базе реакторе создан комплекс для испытания образцов твэлов энергетических реакторов в условиях реактивной аварии (аварии типа RIA).

На ИЯР ВИР, БИР, БР-1, ТИБР, БИГР, ГИР2 был выполнен большой объем исследований по проблеме лазеров с ядерной накачкой (ЛЯН) и ядерно-оптических преобразователей.

На реакторах БИР и БИГР проведены уникальные эксперименты, направленные на обоснование пределов безопасной эксплуатации ИЯР: исследовано долговременное поведение реакторов в режиме саморегулирования мощности, отработана быстродействующая аварийная защита, позволяющая прервать развитие импульса с опасными параметрами.

На реакторе ГИР2 был подготовлен и проведен для студентов СарФТИ цикл лабораторных работ по физике реакторов.

На реакторе БИР-2М совместно с ФГУП «ВНИИФТРИ» были созданы эталонные источники нейтронов, затем комплексы моделирующих опорных полей были созданы на реакторах БР-1М, ГИР2 и БР-К1, на котором также создан эталонный источник реакторных гамма-квантов.

Специалистами ВНИИЭФ постоянно проводятся расчетно-экспериментальные исследования по разработке проектов новых реакторных установок: импульсно-статического реактора бассейно-

вого типа; АИР с большой внутренней полостью и коротким импульсом с топливом на основе уран-молибденового или нептуний-галлиевого сплава, комплекса «БИГР + УФН-П» и др.

Накопленный опыт и постоянно проводимые работы, направленные на техническое усовершенствование действующих и на разработку проектов новых установок, позволяют обеспечивать безаварийную эксплуатацию уникального парка ИЯР и проводить разнообразные научные исследования.

## **Раздел 6. Международная шкала ядерных событий.**

### **Тема 6.1. Международная шкала ядерных событий.**

**INEC.** Цель принятия Международной шкалы ядерных событий (INEC). Классификации событий по шкале (аномалии, инциденты, аварии). Критерии отнесения события к той или иной категории (величина внешнего выброса радиоактивных материалов, степень повреждения ЯЭУ, облучение персонала и т.д.).

**Примеры.** Авария на 1-ом блоке АЭС “Vandellors” (Испания) в 1989 г. как пример серьезного инцидента (события 3-го уровня).

Примеры событий 4 уровня - аварий, не сопровождающихся значительным риском за пределами площадки (авария на критической сборке во ВНИИЭФ в 1997 г. - по критерию “переоблучение”; авария на 1-ом блоке АЭС “St. Laurent” (Франция) в 1969 г. - по критерию “значительное повреждение ЯЭУ”; авария на заводе по переработке топлива в Windscale (Великобритания) в 1973 г. - по критерию “внешний выброс радиоактивности”).

Примеры событий 5 уровня - аварий, сопровождающихся значительным риском за пределами площадки (авария на 2-ом блоке АЭС “Three Mile Island” (США) в 1979 г. - по критерию “серьезное повреждение ЯЭУ”; авария на реакторе “Windscale-1” (Великобритания) в 1957 г. - по критерию “внешний выброс радиоактивности”).

Пример события 6 уровня - серьезной аварий (авария на заводе по переработке топлива в Кыштыме в 1957 г. - “внешний выброс радиоактивности”).

Пример события 7 уровня - крупной аварии (авария на 4-ом блоке Чернобыльской АЭС в 1986 г. - внешний выброс радиоактивности).

Авария на АЭС в Фукусиме.

### **Тема 6.2. Обзор ядерных аварий.**

Обзор аварий, происшедших в атомной промышленности СССР и РФ (13 аварий в период с 1953 по 1997 г.г.). Анализ аварий и выявление нарушений правил ядерной безопасности.

Обзор и анализ некоторых аварий, происшедших в атомной промышленности США (химический завод Y-12, Окридж, 16.06.58; Лос-Аламос, 30.12.58; химический завод в Айдахо, 16.10.59, 25.01.61, 17.10.78; завод в Хэнфорде, 07.04.62).

Обзор и анализ некоторых аварий, происшедших на реакторах и критических сборках (Системы с растворами ДМ; Лос-Аламос, декабрь 1949; Ричлэнд, 16.11.51; Окридж 26.05.54, 01.02.56 и 30.01.68. Металлические системы с отражателем и без отражателя: Лос-Аламос 21.08.45, 21.05.46, 01.02.51, 18.04.52, 03.02.54 и др. Металлические и оксидные системы с замедлителем: Лос-Аламос 06.06.45, лаборатория Чок Ривер (Chalk River) конец 40-х либо начало 50-х г.г. Аргоннская национальная лаборатория 02.06.56 и др).

## **3.3 ПЛАНЫ СЕМИНАРСКИХ ЗАНЯТИЙ**

1 семестр – 16 часов (включая время для дискуссии по теме занятия)

№ недели	Раздел, тема	План занятия	Кол-во часов	Литература (ссылка на № в списке)
1	1.2	Оценка размеров ядер, сравнение с величиной сечений взаимодействия. Расчет среднего пути, который проходит нейтрон в средах до взаимодействия с ядром. Определение связи макроскопического сечения и среднего пути до взаимодействия.	1	1-4
2	1.3	Расчет среднего числа рассеяний нейтрона до достижения тепловой энергии. Расчет замедляющей спо-	1	1-4

		способности и коэффициента замедления.		
3	1.4	Определение величины энергии деления: мгновенная и запаздывающая, локальная и рассеянная составляющие. Определение доли и среднего времени запаздывания запаздывающих нейтронов.	1	1-4
4	1.5	Определение транспортной длины. Определение среднего смещения моноэнергетического нейтрона в процессе диффузии.	1	1-4
5	1.6	Определение среднего смещения нейтрона при замедлении.	1	1-4
6	1.7	Вероятность избежать резонансного захвата. Истинный и эффективный резонансный интеграл.	1	1-4
7	1.8	Критическое уравнение в случае больших размеров АЗ (малого геометрического параметра). Определение выгоды отражателя для толстых и тонких отражателей.	1	1-4
8	1.9	Определение распределения плотности потока нейтронов по объему АЗ в виде прямоугольного параллелепипеда, цилиндра и шара. Определение относительного количества материала, требуемого для указанных типов АЗ с минимальным критическим объемом (АЗ в виде куба, равновеликого цилиндра и шара).	2	1-4
9	1.10	Связь реактивности реактора с периодом разгона (кривая «обратных часов») из уравнения кинетики.	1	1-4
10	1.11	Определение коэффициента умножения нейтронов от внутреннего или внешнего источника		1-4
11	1.12	Определение связи отравления реактора и реактивности, вносимой ксеноном-135. Величины отравления для реактора на высокообогащенном и природном уране.	1	1-4
12	1.13	Определение времени удвоения (наработки топлива на новый реактор) для реакторов на быстрых нейтронах	1	1-4
13	1.14	Особенности температурной зависимости сечений для ксенона-137 и плутония-239. Эффект Доплера	1	1-4, 19
14	2.1	Добыча урана и технология получения закиси-оксида урана $U_3O_8$ . Обогащение урана. Технология получения гексафторида урана $UF_6$ . Газодиффузионный и центробежный методы обогащения	1	20
15	2.2	Принцип работы и отличительные особенности электроядерных установок. Каскадные системы.	1	21
16	2.3	Принцип работы и отличительные особенности исследовательских реакторов бассейнового типа.		5, 7
16	2.4	Применение исследовательских реакторов в ядерной медицине. Нарботка радиоактивных изотопов для диагностики заболеваний и их лечения.	1	24, 25

2 семестр - 18 часов (включая время для дискуссии по теме занятия)

№ недели	Раздел, тема	План занятия	Кол-во часов	Литература (ссылка на № в списке)
1,2	3.1	Расчет критических параметров шара из раствора уранилсульфата (природный уран) в тяжелой воде	2	1-4, 22
3,4	3.2	Расчет допустимого количества подкритических эле-	2	22

		ментов в системе методом аналога плотности (гомогенизации) и методом эквивалентных размеров.		
5	3.3	Влияние замедлителей на критические параметры систем, содержащих нуклиды актиноидной группы элементов	1	1-4, 22
6	3.4	Максимальное энерговыделение при СЦР в урановых и плутониевых системах. Полная доза облучения персонала при СЦР при различных условиях эвакуации.	1	18
7	3.5	Определение значений поглощенной дозы при возможных аварийных воздействиях.	1	18
8	3.6	Пороговая и беспороговая модель воздействия малых доз ионизирующего излучения. Радиационный гермесис.	1	23
9	4.1	Методы определения параметров размножающих систем при проведении критмассовых экспериментов.	2	15
11	5.2	Расчет параметров реакторного импульса (период разгона, максимальная мощность, длительность, энерговыделение)	1	6, 14
12	5.3	Определение напряжений в элементах АЗ с металлическим топливом при режиме «теплого удара». Расчет среднего времени ожидания импульса при слабом источнике нейтронов.	1	6, 14
13	5.4	Методы измерения параметров АИР (период разгона, полуширина импульса, мощность, энерговыделение, реактивность)	1	6, 14
14	5.5	Применение АИР для моделирования реактивностных аварий.	1	26
15	6.1	Примеры ядерных событий разного уровня по шкале INES, включая аварии на Чернобыльской АЭС (1986 г.), на АЭС «Three Mile Island» (1979г.) и АЭС в Фукусиме (2011 г.)	1	9, 18
16	6.2	Анализ некоторых аварий, происшедших на исследовательских реакторах и критических сборках	1	9, 18

#### 4 САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА СТУДЕНТОВ

##### 4.1 ВИДЫ И ФОРМЫ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

- самостоятельный поиск литературы по разделам и темам курса;
- изучение литературы и подготовка к семинарскому занятию;
- ответы на вопросы для обсуждения;
- выполнение контрольной работы;
- подготовка рефератов по темам, предложенным преподавателем;
- подготовка к итоговому (за семестр) тестированию;
- подготовка к зачету,
- подготовка к экзамену.

Календарно-тематический план самостоятельной работы студентов (1-ый семестр)

Номер недели	Номер темы	Задание для СРС	Форма занятий для контроля	Кол-во часов
1-2, 4-8, 9,11-13	1.1-1.3, 1.5-1.9, 1.10 1.12-1.14	Подготовка к занятиям	УО	11
3,8,10	1.4,1.11,	Подготовка к дискуссии	Д	10

14-15	2.1-2.4			
9	1.1-1.9	Подготовка к контрольной работе (домашнего задания)	КР	3
16	1.1-1.14, 2.1-2.4	Подготовка к итоговому тестированию	Тестирование	6
17	1.1-1.14; 2.1-2.4	Подготовка к зачету	Зачет	10
			ИТОГО:	40

#### Календарно-тематический план самостоятельной работы студентов (2-ой семестр)

Номер недели	Номер темы	Задание для СРС	Форма занятий для контроля	Кол-во часов
1-6,9-11	3.2-3.4, 4.1, 5.1-5.4	Подготовка к занятиям	УО	10
7-8, 14-16	3.5-3.6, 5.5, 6.1-6.2	Подготовка к дискуссии	Д	9
12,13	1.1-1.9	Подготовка к защите реферата	Реферат	6
17	1.1-1.14, 2.1-2.4	Подготовка к итоговому тестированию	Тестирование	5
18		Подготовка к экзамену	экзамен	10
			ИТОГО:	40

#### 4.2 ФОРМЫ КОНТРОЛЯ

Посещаемость лекций и практических занятий, проверка контрольной работы (домашнего задания), защита рефератов, устный опрос, участие в дискуссиях, написание тестов, сдача зачета и экзамена.

### 5 КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

#### 5.1. 1 семестр

*Текущий и итоговый контроль знаний студентов:*

- устный опрос;
- участие в дискуссиях;
- выполнение контрольной работы (домашнего задания);
- посещаемость;
- написание итогового теста;
- сдача зачета по предложенным билетам.

##### 5.1.1 Контрольная работа

Приведена в ФОС.

##### 5.1.2. ИТОГОВЫЙ ТЕСТ ПО материалам 1 семестра

Приведен в ФОС.

##### 5.1.2. ВОПРОСЫ К ЗАЧЕТУ.

1 Взаимодействие нейтронов с ядрами. Микроскопическое и макроскопическое сечения

- 2 Замедление нейтронов. (Механизм замедления, величина энергии, теряемой в одном столкновении, средний косинус угла рассеяния, средняя логарифмическая потеря энергии).
- 3 Замедлители. (Назначение, материалы замедлителей, замедляющая способность, коэффициент замедления).
- 4 Спектр замедляющихся нейтронов. (Зависимость потока нейтронов от энергии в водородосодержащей среде без поглощения, зависимость потока от энергии в общем случае, влияние поглощения на нейтронный спектр).
- 5, Эффективный и истинный резонансные интегралы.
- 6 Диффузия моноэнергетических нейтронов. (Понятие диффузии, уравнение диффузии, длина диффузии).
- 7 Диффузия замедляющихся нейтронов. (Теория возраста Ферми, уравнение возраста, возраст нейтрона).
- 8 Длина диффузии, возраст нейтрона, длина миграции, время замедления нейтрона и время диффузии в тепловой области.
- 9 Деление тяжелых ядер (Возможность деления, делимые и делящиеся нуклиды, энергия деления).
- 10 Нейтроны деления, мгновенные и запаздывающие нейтроны.
- 11 Коэффициент размножения в бесконечной среде. Формула четырех сомножителей.
- 12 Коэффициент размножения на быстрых нейтронах, вероятность избежать резонансного захвата, коэффициент использования тепловых нейтронов, число вторичных нейтронов на один захват.
- 13 Гомогенная и гетерогенная среда.
- 14 Критическое уравнение реактора. Геометрический и материальный параметры
- 15 Отражатель нейтронов (назначение, выгода отражателя, "бесконечный отражатель")
- 16 Реактивность, разгон реактора, роль запаздывающих нейтронов.
- 17 Уравнение кинетики реактора.
- 18 Критичность на мгновенных и на запаздывающих нейтронах. Единицы измерения реактивности.
- 19 Воспроизводство ядерного горючего. (Получение ядерного горючего из ядерного сырья, коэффициент воспроизводства, расширенное воспроизводство).
- 20 Расширенное воспроизводство ядерного топлива в реакторах на быстрых нейтронах.
- 21 Отравление реактора изотопом  $^{135}\text{Xe}$ . (Влияние ксенона на реактивность, ксеноновая яма, неустойчивость реактора с большим потоком).
- 22 Температурные коэффициенты реактивности. (Плотностные и ядерные коэффициенты реактивности).
- 23 Добыча, переработка, обогащение урана и изготовление реакторного топлива
- 24 Энергетические ядерные реакторы: классификация и типы энергетических реакторов
- 25 Исследовательские ядерные реакторы: физические особенности и типы

## 5.2 2 семестр

*Текущий и итоговый контроль знаний студентов:*

- устный опрос;
- участие в дискуссиях;
- защита реферата;
- посещаемость;
- написание итогового теста;
- сдача экзамена по предложенным билетам.

### 5.2.1 Темы рефератов

1. Управляемые ускорителем подкритические сборки и их использование для сжигания радиоактивных отходов (реакторы-мусорщики)
2. Уран-ториевый топливный цикл.
3. MOX-топливо и его использование в энергетических реакторах.

4. Типы энергетических реакторов и их усовершенствование.
5. Аварии на исследовательских реакторах и критических сборках и их последствия.
6. Работоспособность ТВЭЛ энергетических реакторов при реактивных авариях.
8. Аварии на АЭС и их последствия.
9. Реакторы РФЯЦ-ВНИИЭФ.
10. Природный реактор в Габоне.
11. Способы добычи и переработки урановой руды.
12. Способы обогащения урана.
13. «Человеческий фактор» и его влияние на безопасность ядерных установок.
14. Первый в мире реактор Chicago Pile
15. Первая в мире АЭС (г. Обнинск)
16. Влияние ионизирующего облучения на живые организмы.
17. Использование реакторов для получения медицинских изотопов.

#### 5.2.2 ИТОГОВЫЙ ТЕСТ ПО материалам 2 семестра

Приведен в ФОС.

#### 5.2.2 ВОПРОСЫ К ЭКЗАМЕНУ

- 1 Замедление нейтронов. (Механизм замедления, величина энергии, теряемой в одном столкновении, средний косинус угла рассеяния, средняя логарифмическая потеря энергии).
- 2 Замедлители. (Назначение, материалы замедлителей, замедляющая способность, коэффициент замедления).
- 3 Спектр замедляющихся нейтронов. (Зависимость потока нейтронов от энергии в водородосодержащей среде без поглощения, зависимость потока от энергии в общем случае, влияние поглощения на нейтронный спектр)
- 4 Диффузия моноэнергетических нейтронов. (Понятие диффузии, уравнение диффузии, длина диффузии).
- 5 Диффузия замедляющихся нейтронов. (Теория возраста Ферми, уравнение возраста, возраст нейтрона).
- 6 Деление тяжелых ядер (Возможность деления, делимые и делящиеся нуклиды, энергия деления).
- 7 Нейтроны деления, мгновенные и запаздывающие нейтроны.
- 8 Коэффициент размножения в бесконечной среде. Формула четырех сомножителей.
- 9 Критическое уравнение реактора. Геометрический и материальный параметры
- 10 Отражатель нейтронов (назначение, выгода отражателя, "бесконечный отражатель")
- 11 Реактивность, разгон реактора, роль запаздывающих нейтронов.
- 12 Уравнение кинетики реактора.
- 13 Критичность на мгновенных и на запаздывающих нейтронах. Единицы измерения реактивности.
- 14 Воспроизводство ядерного горючего..
- 15 Отравление и шлакование реактора.
- 16 Плотностные и ядерные температурные коэффициенты реактивности.
- 17 Основные понятия ядерной безопасности (ЯБ): критическая система, критическая масса, критический размер, минимальный критический размер, безопасный размер, внешний коэффициент умножения.
18. Физические основы ядерной безопасности: влияние на критичность формы размножающей системы (РС), плотности, наличия отражателя, степени разбавления.
- 19 Закономерности протекания СЦР. Влияние на протекание СЦР скорости ввода реактивности, механизма гашения, начального фона нейтронов в системе и времени жизни нейтронов.
20. Критические параметры пространственных решёток, образованных отдельными компонентами из делящегося материала (ДМ). Защищающий контейнер.
21. Источники нейтронов и  $\gamma$ -квантов в реакторе.
22. Биологическое действие ионизирующих излучений.
- 23 Основные принципы проведения критмассовых экспериментов и обеспечение ядерной безопасности.

- 24 Основные параметры размножающих систем, определяемые в экспериментах. Способы формирования расчетных критических моделей стендовых сборок.
- 25 Общие сведения о критических стендах, используемых в стране и за рубежом.
- 26 Импульсные ядерные реакторы (ИЯР). Классификация ИЯР. Принцип работы импульсного ядерного реактора аperiodического (самогасящегося) действия (АИР).
- 27 Типы АИР на быстрых нейтронах.
- 28 Типы АИР на тепловых нейтронах.
- 29 Механизмы гашения реактивности в АИР.
- 30 Параметры импульса делений в АИР без учета механической инерции элементов топлива.
- 31 Понятие сильного и слабого источника нейтронов. Флуктуации импульсов при слабом источнике.
- 32 Эффекты теплового удара в АИР на быстрых нейтронах.
- 33 Особенности водного импульсного реактора ВИР-2М.
- 34 Особенности быстрых импульсных реакторов с металлической АЗ (БИР-2М, БР-1М, БР-К1, ГИР2).
- 35 Быстрый импульсный графитовый реактор БИГР.
- 36 Использование АИР для проведения научных исследований
- 37 Международная шкала ядерных событий.

### 5.3. УРОВЕНЬ ТРЕБОВАНИЙ И КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ

Текущий контроль осуществляется в ходе учебного процесса, консультирования студентов, проверки выполнения ими самостоятельных (реферат), контрольных и тестовых заданий.

Формой аттестации являются зачет и экзамен, которые проводятся в виде ответов на вопросы по курсу.

Оценка знаний студентов осуществляется в баллах в комплексной форме с учетом:

- оценки за работу в семестре;
- оценки знаний в ходе зачета (экзамена)

Ориентировочное распределение баллов по видам работы:

#### **1 семестр**

- посещаемость – 5 баллов;
- участие в дискуссиях – 10 баллов;
- контрольная работа – 15 баллов;
- итоговый тест – 20 баллов;
- зачет – 50 баллов.

Итого – 100 баллов

#### **2 семестр**

- посещаемость – 5 баллов;
- участие в дискуссиях – 10 баллов;
- реферат – 15 баллов;
- итоговый тест – 20 баллов;
- экзамен – 50 баллов.

Итого – 100 баллов

#### **Контроль посещаемости**

Заслуженный балл выставляется преподавателем в конце семестра, исходя из следующих критериев:

Общая посещаемость	Максимальный балл
100-90%	5
90-80%	4
80-70	3

70-60	2
60-50	1
Менее 50%	0

Оценка знаний по 100-бальной шкале в соответствии с критериями СаpФТИ НИЯУ МИФИ реализуется следующим образом

Количество баллов	Зачет	Оценка за экзамен (ECTS)	Критерии оценивания
90 - 100	зачтено	A	"Отлично" – содержание курса освоено полностью, без пробелов; практические навыки работы сформированы; все учебные задания выполнены с высоким баллом
85 - 89	зачтено	B	"Очень хорошо" – содержание курса освоено полностью; практические навыки работы в основном сформированы; все учебные задания выполнены с высоким баллом
75 - 84	зачтено	C	"Хорошо" – содержание курса освоено полностью, без пробелов; некоторые практические навыки работы сформированы недостаточно; все учебные задания выполнены с качеством, которое не оценивалось минимальным количеством баллов; некоторые задания выполнены с ошибками
65 - 74	зачтено	D	"Удовлетворительно" - содержание курса освоено частично, но пробелы не носят существенного характера; необходимые практические навыки работы в основном сформированы; большинство учебных заданий выполнено, но с ошибками
60 - 64	зачтено	E	"Посредственно" - содержание курса освоено частично; многие задания не выполнены или их качество оценено минимальным количеством баллов
Ниже 60	не зачтено	F	"Неудовлетворительно" – очень слабые знания, недостаточные для понимания курса

## 6 ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

В соответствии с требованиями ФГОС ВО по подготовке студентов для направления (специальности 03.04.01 «Прикладная математика и физика» реализация компетентного подхода к обучению предусматривает широкое использование в учебном процессе активных и интерактивных форм проведения занятий в сочетании с внеаудиторной работой с целью формирования и развития профессиональных навыков студентов. В рамках учебного курса студенты работают с лекциями, рекомендованной литературой, выполняют лабораторные работы, готовят семинары, выполняют домашние задания. В процессе подготовки студенты используют информационные источники, размещенные в сети Интернет (официальные сайты, веб-порталы и веб-представительства организаций, предприятий и учреждений, тематические форумы и телекоммуникации), электронные учебники и учебно-методические пособия.

## 7 УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

### ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. Г.Г. Бартоломей, Г.А. Бать, В.Д. Байбаков и др. Основы теории и методы расчёта ядерных энергетических реакторов. М.: Энергоатомиздат, 2010.
2. В.Е. Левин. Ядерная физика и ядерные реакторы. М.: Атомиздат, 2013
3. А.Н. Климов. Ядерная физика и ядерные реакторы. М.: Энергоатомиздат, 2007
4. Дж.Р. Кипин. Физические основы кинетики ядерных реакторов. М.: Атомиздат, 2015
5. Г.А. Бать, А.С. Коченов, Л.П. Кабанов. Исследовательские ядерные реакторы. М.: Атомиздат, 2003
6. Е.П. Шабалин. Импульсные реакторы на быстрых нейтронах. М.: Атомиздат, 2013.
- 7 Исследовательские ядерные установки России. Под редакцией Архангельского Н.В., Третьякова И.Т., Федулина В.Н. М.: ОАО «НИКИЭТ», 2012. 328 с.
8. В.Ф. Колесов. Апериодические импульсные реакторы. г.Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 1999.

### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

9. Букринский А.М., Федулов В.С. Международная шкала оценки опасности событий на АЭС.// Атомная энергия.- 1991.- т.70.- вып.1.- с.3-8.
10. Леваков Б.Г., Лукин А.В., Магда Э.П. и др. Импульсные ядерные реакторы РФЯЦ-ВНИИТФ. Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 2002.
11. А.М. Воинов, М.И. Кувшинов. Критмассовые стенды и исследовательские импульсные реакторы. Атом, 2002, №19, с.11-13.
12. Петрин С.В., Богданов В.Н., Воронцов С.В. и др. Результаты анализа безопасности эксплуатации реакторных установок ВНИИЭФ.// ВАНТ. Серия: Физика ядерных реакторов, 2000 - вып.2/3.- с. 95-102.
13. Воинов М.А., Воронцов С.В., Колесов В.Ф. и др. Использование импульсного реактора ГИР-2 для обучения студентов.// ВАНТ. Серия: Физика ядерных реакторов, 2000 - вып.2/3.- с. 75-79.
14. Воинов М.А., Воронцов С.В., Девяткин А.А. и др. История создания и развития импульсных ядерных реакторов в РФЯЦ-ВНИИЭФ.// ВАНТ, сер. Физика ядерных реакторов, 2017, вып.4. с.5-20
15. Воронцов С.В., Девяткин А.А., Панин А.В. и др. История развития критмассовых экспериментов в РФЯЦ-ВНИИЭФ.// ВАНТ, сер. Физика ядерных реакторов, 2016, вып.4. с.24-30
16. В.Ф.Колесов, М.И.Кувшинов, С.В.Воронцов и др. Критические стенды и импульсные реакторы РФЯЦ-ВНИИЭФ.- В кн. 65 лет ВНИИЭФ. Физика и техника высоких плотностей энергии: Научное издание.- в 2-х выпусках. Выпуск 1. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2011.-335с.
17. С.П.Мельников, А.Н.Сизов, А.А.Синянский. Лазеры с ядерной накачкой. Саров. ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». 2008. 440с.
18. McLaughlin T.P., Monahan S.P., Pruvost N.L. et al. "A Review of Criticality Accidents. 2000 Revision," LA-13638 (2000).
- 19 Таблицы физических величин. Справочник. Под редакцией академика И.К. Кикоина. М.: Атомиздат. 1976. 1008 с.
20. А.К. Круглов. Как создавалась атомная промышленность в СССР. М.: ЦНИИАтоминформ. 1995. 380 с.
21. Колесов В.Ф. Электроядерные установки и проблемы ядерной энергетики. Монография. Саров: ФГУП «РФЯЦ – ВНИИЭФ». 2013.
22. Критические параметры делящихся материалов и ядерная безопасность. Справочник. Л.В. Диев, Б.Г. Рязанов, А.П. Мурашов и др. М.: Энергоатомиздат. 1984. 176 с.
23. И.Б. Кеирим-Маркус. Новые сведения о действии на людей малых доз ионизирующего излучения - кризис господствующей концепции регламентации облучения. //Медицинская радиология и радиационная безопасность.- 1997.-№2.- с. 18-25 (с дополнением)
24. А.Н. Нерозин О.П. Власова. Ядерная медицина на страже здоровья. // Энергия: экономика, техника, экология.- 2017.- №10.- с. (эл. копия)

25. Б.Л.Жуйков. Успехи и проблемы получения медицинских радиоизотопов в России.// Успехи физических наук.- 2016.- том 186, №5.- с.544-549 (копия)  
26. Богданов В.Н., Ильин В.И., Колесов В.Ф. и др. Поведение твэлов в авариях типа RIA.// Атом. 2003. №22. с.29-31.

#### ПЕРИОДИЧЕСКАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Атомная энергия
2. Атомная техника за рубежом
3. Вопросы атомной науки и техники (ВАНТ). Серия: Физика ядерных реакторов
4. Nuclear Science and Engineering
5. Известия вузов: Ядерная энергетика

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

Материально-техническое обеспечение включает в себя специально оборудованные кабинеты и аудитории: компьютерные классы, аудитории, оборудование мультимедийными средствами обучения.

### **9 МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОРГАНИЗАЦИИ ИЗУЧЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ (ДЛЯ ПРЕПОДАВАТЕЛЕЙ И СТУДЕНТОВ)**

Изучение дисциплины «Ядерные реакторы» предполагает освоение материалов лекций, систематическую работу студентов в ходе проведения семинарских занятий, тестовых заданий, выполнение заданий для самостоятельной работы.

На лекциях раскрываются основные вопросы в рамках рассматриваемой темы, ставятся акценты на наиболее сложных положениях изучаемого материала. Материалы лекции используются студентами для подготовки к семинарским занятиям.

Целью семинарского занятия является рассмотрение основных и наиболее проблемных вопросов в рамках темы занятия, контроль за степенью усвоения студентами пройденного материала и ходом выполнения ими заданий самостоятельной работы. В ходе семинарских занятий закрепляются умения и навыки использования прослушанного в ходе лекций и самостоятельных работ материала, его дальнейшее осмысление с целью более глубокой увязки с общефизической картиной мира.

Задания для самостоятельной работы предусмотрены для закрепления и расширения знаний, умений и навыков, приобретенных в результате изучения дисциплины. Задания выполняются студентами в письменном виде во внеаудиторное время.

Работа должна носить творческий характер. При ее оценке учитывается обоснованность и оригинальность выводов. В письменной работе студент должен полно и всесторонне рассмотреть все аспекты задания, четко сформулировать и аргументировать свою позицию по исследуемым вопросам.

Преподавание дисциплины требует в каждой теме выделить наиболее важные, базовые моменты и сделать акцент на них. Предлагается:

в теме 1.1 обратить внимание на определение понятия «ядерный реактор», на принцип действия ЯР и на применение различных типов ЯР;

в теме 1.2 обратить внимание на связь макроскопического сечения со скоростью реакций в единице объема и со средней длиной пути нейтрона до взаимодействия, на зависимость различных сечений взаимодействия от энергии нейтронов и типов ядер, на значительный рост сечения деления делящихся изотопов в тепловой области, на пороговый характер сечения для делимых изотопов, на уменьшение сечения реакции радиационного захвата в быстрой области;

в теме 1.3 обратить внимание на цель замедления нейтронов - возможность создать реактор на природном или слабо обогащенном уране, на требования к замедлителям, на наиболее эффективные замедлители, на понятие «вероятность избежать резонансного захвата».

в теме 1.4 обратить внимание на уникальность процесса деления под действием нейтронов (возможность получения самоподдерживающейся цепной реакции), на процесс спонтанного деления ядер, на понятие делимых и делящихся нуклидов, на величину энергии деления, на обусловленное  $\beta$ -распадом остаточное тепловыделение и связанные с ним опасности, на величину средне-

го число нейтронов на деление, на понятия мгновенных и запаздывающих нейтронов, на величину выхода и доли запаздывающих нейтронов;

в теме 1.5 обратить внимание на отличие плотности потока и диффузионного тока нейтронов, на определение длины диффузии, на связь длины диффузии со среднеквадратичным пробегом теплового нейтрона, на суть теории возраста Ферми, на понятие возраста нейтрона, на связь возраста со среднеквадратичным пробегом замедляющегося нейтрона, на понятие длины миграции нейтрона

в теме 1.6 обратить внимание на суть теории возраста Ферми, на понятие возраста нейтрона, на связь возраста со среднеквадратичным пробегом замедляющегося нейтрона, на понятие длины миграции нейтрона;

в теме 1.7 обратить внимание на значение коэффициента размножения нейтронов в бесконечной среде (формула четырех сомножителей) и его составляющие, на преимущества реактора с гетерогенной АЗ, на оптимальные параметры размножающих сред;

в теме 1.8 обратить внимание на влияние утечки на коэффициент размножения, на критическое уравнение реактора, на материальный и геометрический параметры и их равенство в критическом состоянии, на взаимосвязь возраста и длины диффузии в замедлителе и в АЗ реактора, на влияние отражателя нейтронов на коэффициент размножения;

в теме 1.9 обратить внимание на конкретные примеры решения уравнения диффузии в аналитическом виде и получение критических размеров АЗ различной геометрии (прямоугольный параллелепипед, цилиндр, шар);

в теме 1.10 обратить внимание на понятие реактивности и ее связь с коэффициентом размножения, на характер изменения потока нейтронов в некритическом реакторе, на понятие периода реактора, на роль запаздывающих нейтронов в управлении реактором, на связь реактивности с периодом реактора, на понятие реактивности на мгновенных нейтронах, на соотношение шкал общей и мгновенной реактивности, на единицы измерения реактивности;

в теме 1.11 обратить внимание на факт размножения нейтронов от постоянно действующего источника в подкритическом реакторе, на понятия физического и энергетического пуска реактора, на причины снижения реактивности в работающем реакторе, на связь выгорания с количеством образовавшихся продуктов деления, способы управления реактором;

в теме 1.12 обратить внимание на процессы, связанные с отравлением реактора изотопом  $^{135}\text{Xe}$ , определить величину «отравления» и ее связь отрицательной реактивностью, вносимой ксеноном, дать понятие ксеноновой ямы, ксеноновых волн, описать процессы шлакования реактора и дать классификацию шлаков;

в теме 1.13 обратить внимание на понятие коэффициента воспроизводства (конверсии), на суть уран-плутониевого топливного цикла и на преимущества реакторов на быстрых нейтронах для обеспечения расширенного воспроизводства, на суть уран-ториевого топливного цикла и на возможность реализации расширенного воспроизводства в реакторе на тепловых нейтронах.

в теме 1.14 обратить внимание на наличие связи температуры АЗ реактора и реактивности и на понятие и типы температурных коэффициентов реактивности.

в теме 2.1 обратить внимание на способы добычи и переработки урановой руды для получения конечного продукта («yellow cake»), на способы обогащения урана;

в теме 2.2 обратить внимание на классификацию и типы энергетических реакторов, на современные перспективные разработки энергетических реакторов;

в теме 2.3 обратить внимание на классификацию и физические особенности исследовательских реакторов и на тенденции их развития;

в теме 2.4 обратить внимание на использование исследовательских ЯР для наработки медицинских изотопов ( $\text{Mo-99}$ ,  $\text{Sr-89}$  и др.), используемых для диагностики заболеваний и их лечения;

в теме 3.1 обратить внимание на понятие критической массы, критического размера, безопасного размера, на влияние на критичность системы ее формы, наличия отражателей и замедлителей, плотности среды;

в теме 3.2 обратить внимание на нейтронное взаимодействие в подкритических системах, которое может привести к достижению критичности, на конструкцию и назначение защищающего контейнера;

в теме 3.3 обратить внимание на возможность СЦР для различных нуклидов актиноидной группы;

в теме 3.4 обратить внимание на закономерности протекания СЦР, на влияние на протекание СЦР нейтронного фона и скорости ввода реактивности;

в теме 3.5 обратить внимание на источники нейтронов (мгновенные и запаздывающие нейтроны, нейтроны активации и фотонейтроны) и гамма-квантов (мгновенные, кванты радиоактивного распада, активации, радиационного захвата, реакций с образованием заряженных частиц, аннигиляционные) в реакторе;

в теме 3.6 обратить внимание на механизм биологического действия ионизирующих излучений, радиационные эффекты облучения людей, стойкость различных живых организмов к действию ионизирующего излучения;

в теме 4.1 обратить внимание на основные принципы проведения экспериментов с использованием специальных критических стендов и обеспечение ядерной безопасности работ, на параметры размножающих систем, определяемые в экспериментах (коэффициент размножения, коэффициент умножения, реактивность, возмущение реактивности образцами, спектр нейтронов), на способы формирования расчетных критических моделей стендовых сборок;

в теме 5.1 обратить внимание на определение, принцип действия и характерные отличия импульсных реакторов, на принцип действия АИР и на определяющую роль отрицательного температурного коэффициента реактивности, на возможность прогнозирования параметров импульса делений;

в теме 5.2 обратить внимание на классификацию АИР и на механизмы гашения реактивности в АИР разных типов, на характерные особенности работы реакторов с различными типами топлива.

в теме 5.3 обратить внимание на последовательность генерирования вспышки делений в АИР, характер изменения во времени реактивности, мощности и температуры, форму импульса делений, на эффект теплового удара и способы защиты от него, на флуктуация вспышек при слабом источнике нейтронов;

в теме 5.4 обратить внимание на расчет параметров импульса реактора и методы их измерения;

в теме 5.5 обратить внимание на конкретные примеры использования АИР для проведения научных исследований;

в теме 6.1 обратить внимание на классификацию аварий и инцидентов в соответствии с Международной шкалой ядерных событий (INES) и привести конкретные примеры;

в теме 6.2 обратить внимание на конкретные примеры ядерных аварий, происшедших на исследовательских реакторах и критических стендах, в частности – на критических стендах ВНИИЭФ.

РП составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки 03.04.01 «Прикладные математика и физика»

## **Лист регистрации изменений**