

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
Димитровградский инженерно-технологический институт –  
филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего  
образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
(ДИТИ НИЯУ МИФИ)

**«УТВЕРЖДАЮ»**  
Заместитель руководителя

\_\_\_\_\_ Т.И. Романовская  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**

**Б1.О.04.06 Физическая теория реакторов**

Специальность \_\_\_\_\_ Ядерные реакторы и материалы 14.05.01

Квалификация выпускника \_\_\_\_\_ Инженер-физик

Специализация \_\_\_\_\_ Ядерные реакторы

Форма обучения \_\_\_\_\_ Очная

Выпускающая кафедра \_\_\_\_\_ Ядерные реакторы и материалы

Кафедра-разработчик рабочей программы \_\_\_\_\_ Ядерные реакторы и материалы

Семестр	Трудоемкость час. (ЗЕТ)	Лекций, час.	Практич. занятий, час.	Лаборат. работ, час.	СРС, час.	Форма промежуточ- ного контроля (экз., час./зачет)
6	2	17	-	-	55	зачет
7	4	17	34	-	93	зачет
8	4	17	17	-	74	Экзамен
<b>ИТОГО</b>	<b>10</b>	<b>51</b>	<b>51</b>		<b>222</b>	

Димитровград  
2019 г.

## 1 ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

**Целью** преподавания дисциплины «Физическая теория реактора» является начальное ознакомление и приобретение базовых знаний о ядерных реакторах, ядерной энергетике и физических основах этой инженерной деятельности, выросшей из законов ядерной и нейтронной физики. Освоение практических методик расчета процессов в реакторе на основе диффузионной теории.

**Задачами** изучения дисциплины являются:

- изучение процессов, идущих в ядерных реакторах – деление ядра, цепную реакцию, выделение энергии, взаимодействие нейтронов с веществом;
- изучение основ транспорта нейтронов, понятия сечений взаимодействия нейтронов, вычисление скоростей реакций, плотности потока нейтронов; практическое освоение приемов
- изучение простейшей теории критичности реактора, методы расчета ядерных реакторов, простейшие уравнения кинетики и динамики реактора и способы их решения
- ознакомление с применением ядерных реакторов в различных областях науки и техники, с принципами работы ядерных электростанций, с состоянием и перспективами ядерной энергетике в РФ и в мире при особо уделить внимание вопросам безопасности ядерной энергетике.

## 2 МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОП ВО

Дисциплина Физическая теория реакторов относится к базовой части блока 1 профессионального модуля учебного плана.

Необходимыми условиями для освоения дисциплины являются:

знание общей физики и математики в пределах 1-3 семестров естественнонаучного модуля учебного плана,

умение работать с научной и справочной литературой,

владение основами работы на компьютере с пакетом программ Microsoft Office.

Таблица 2.1 - Перечень предшествующих и последующих дисциплин, формирующих общекультурные и профессиональные компетенции

Код	Наименование компетенции	Предшествующие дисциплины	Последующие дисциплины (группы дисциплин)
Общекультурные компетенции			
ОК-1	Способность к абстрактному мышлению, анализу и синтезу	Математический анализ	Ядерные технологии
Профессиональные компетенции			
ПК-1	способностью создавать теоретические и математические модели, описывающие нейтронно-физические процессы в реакторах, процессы гидродинамики и теплопереноса в активных зонах или воздействие ионизирующего излучения на материалы, человека и объекты окружающей среды, системы учета, контроля ядерных материалов	Ядерная физика	Методы анализа топливного цикла, внутренний топливный цикл
ПК-3	Способностью использовать фундаментальные законы в области физики	Уравнения математической физики	Динамика и безопасность ЯЭУ

	атомного ядра и частиц, ядерных реакторов, термодинамики, гидродинамики и тепломассопереноса в объеме достаточном для самостоятельного комбинирования и синтеза идей, творческого самовыражения		
--	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--	--

### 3 ТРЕБОВАНИЯ К РЕЗУЛЬТАТАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование элементов компетенций в соответствии с ОС НИЯУ МИФИ и ОП ВО по данному направлению подготовки (специальности).

Таблица 3.1 - Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине

Планируемые результаты освоения ОП (компетенции), достижение которых обеспечивает дисциплина		Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине
Код компетенции	Содержание компетенции	Знать: Уметь: Владеть:
ПК-1	способностью создавать теоретические и математические модели, описывающие нейтронно-физические процессы в реакторах, процессы гидродинамики и тепломассопереноса в активных зонах или воздействие ионизирующего излучения на материалы, человека и объекты окружающей среды, системы учета, контроля ядерных материалов	Знать: Основные законы физики и математики, а также границы их применимости; основные уравнения переноса нейтронов и законы распределения энерговыделения в активной зоне реактора  Уметь: применять знания для составления и решения дифференциальных и интегральных уравнений, а также систем уравнений.  Владеть: навыками использования основных физических и математических законов
ПК-2	готовностью к созданию новых методов расчета современных реакторных установок и физических устройств, методов исследования теплофизических процессов и свойств реакторных материалов и теплоносителей; разработке новых систем преобразования тепловой и ядерной энергии в электрическую, методов и методик оценки количественных характеристик ядерных материалов	Знать: основные физические законы и методы расчета Уметь: указать, какие законы описывают данное физическое явление или эффект, проводить измерения, а также рассчитывать их погрешность погрешности Владеть: навыками применения физических законов и работы с физическими величинами
ПК-3	способностью использовать фундаментальные законы в области физики атомного	Знать: параметры, определяющие мощность реактора и скорость ее изменения, органы регулирования мощности реактора

	ядра и частиц, ядерных реакторов, термодинамики, гидродинамики и тепломассопереноса в объеме достаточном для самостоятельного комбинирования и синтеза идей, творческого самовыражения	Уметь: строить дифференциальные и интегральные характеристики КС Владеть: методиками расчета критического положения КС
ПК-7	способностью оценивать риск и определять меры безопасности для новых установок и технологий, составлять и анализировать сценарии потенциально возможных аварий, разрабатывать методы уменьшения риска их возникновения	Знать: основные и потенциальные опасности ядерных технологий и установок основные требования ядерной безопасности при физическом пуске, выходе на минимальный контролируемый уровень и работе в базовом режиме. Уметь: анализировать системы безопасности, рассчитывать эффективность органов регулирования и системы управления и защиты реактора Владеть: навыками расчета современных систем, приборов и устройств
ПК-25	готовностью к оценке ядерной и радиационной безопасности, к оценке воздействия на окружающую среду, к контролю за соблюдением экологической безопасности, техники безопасности, норм и правил производственной санитарии, пожарной, радиационной и ядерной безопасности, норм охраны труда	Знать: основы законодательства обращения с радиоактивными источниками, а также санитарные правила и нормы радиационной безопасности Уметь: применять навыки работы с технической документацией, а также чтения чертежей Владеть: терминологией, применяемой в НРБ и Сан-Пин
ПК-29	способностью эксплуатировать, проводить испытания и ремонт современных физических установок	Знать: конструкционные особенности установок, основные режимы эксплуатации, а также способы вывода реактора в критическое состояние, на рабочую мощность и остановки реактора Уметь: составлять регламент физического пуска реактора и вывода реактора на необходимый уровень мощности; выбирать оптимальный регламент управления нейтронной мощностью реактора Владеть: методами оценки мощности, расчета основных теплотехнических и нейтронно-физических параметров ЯЭУ
ПСК-1.6	способностью рассчитывать основные характеристики ядерных реакторов и энергетических установок	Знать: особенности конструкции тепловыделяющих элементов ядерных реакторов различных типов, основные материалы, используемые в реакторной технике, понятия тепловой и электрической мощности, температуры, паропроизводительности, давления, температуры, расхода теплоносителя. Уметь: работать с технической документацией, вести поиск по базам данных и системам универсальной десятичной классификации. Владеть: методами оценки мощности, расчета основ-

		ных теплотехнических и нейтронно-физических параметров ЯЭУ
ПСК-1.7	способностью проводить нейтронно-физический и теплогидравлический расчет ядерных установок	Знать: основные нейтронно-физические процессы в активной зоне реактора, распределение энерговыделения, коэффициента неравномерности Уметь: оценивать скорость проходящих ядерных реакций, температуру, давление, расход теплоносителя и рабочего тела Владеть: методикой расчета теплотехнических и нейтронно-физических параметров ядерных установок
ПСК-1.12	готовностью использовать современные средства автоматического регулирования, управления и защиты ядерных установок	Знать: параметры, определяющие мощность реактора и скорость ее изменения, органы регулирования мощности реактора Уметь: строить дифференциальные и интегральные характеристики КС Владеть: методиками расчета критического положения КС

## 4 СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

### 4.1 Структура дисциплины

Общая трудоемкость (объем) дисциплины составляет \_\_\_\_\_ зачетных единиц (ЗЕТ), \_\_\_\_\_ академических часов.

Таблица 4.1

**Объём дисциплины по видам учебных занятий (в соответствии с учебным планом)**

Вид учебной работы	Всего, зачетных единиц (акад. ча-	Семестр		
		6	7	8
<b>Общая трудоемкость дисциплины</b>	9(324)			
<b>Контактная работа с преподавателем:</b>				
занятия лекционного типа	52	16	19	17
занятия семинарского типа				
в том числе: семинары				
практические занятия	55		38	17
практикумы				
лабораторные работы				
другие виды контактной работы				
в том числе: курсовое проектирование				
групповые консультации				
индивидуальные консультации				
иные виды внеаудиторной контактной работы				
<b>Самостоятельная работа обучающихся**:</b>	<b>181</b>	<b>20</b>	<b>87</b>	<b>74</b>
изучение теоретического курса	181	20	87	74
расчетно-графические задания, задачи				
реферат, эссе				
курсовое проектирование				
<b>Вид промежуточной аттестации (зачет***, экзамен)</b>		зачет	зачет	Экзамен(36)

### Распределение учебной нагрузки по разделам дисциплины

Таблица 4.2

№ модуля образовательной программы*	№ раздела	Наименование раздела дисциплины	Виды учебной нагрузки и их трудоемкость, акад. часы					Формируемые компетенции
			Лекции	Практические занятия	Лабораторные работы	Самостоятельная работа	Всего часов	
	1	Введение	2	1		12	15	ПСК -1.1 ПК-10 ПСК-1.6 ПК-1
	2	Основные понятия теории ядерных реакторов	4	1		14	19	ПСК -1.10 ПСК -1.9 ПСК-1.6 ПК-1
	3	Ядерные процессы в реакторах	4	1		18	23	ПСК -1.7 ПК-1 ПСК -1.10 ПК-6
	4	Нейтронные поперечные сечения	4	1		16	21	ПК-1 ПК-7 ПСК-1.6 ПСК-1.7
	5	Нейтронные реакции	5	8		16	29	ПК-7 ПСК-1.6 ПСК-1.7 ПСК-1.10
	6	Модели рассеяния и спектры нейтронов	6	8		18	32	ПК-1 ПК-6 ПСК-1.6 ПСК-1.9 ПСК-1.10
	7	Диффузия нейтронов	8	8		20	36	ПСК -1.12 ПСК-1.10 ПСК-1.7 ПСК-1.6
	8	Критический размер и управление реактором.	4	6		16	26	ПСК -1.12 ПСК-1.10 ПСК-1.7 ПСК-1.6
	9	Изменение состава горючего и реактивности.	4	6		16	26	ПСК -1.12 ПСК-1.10 ПСК -1.9
	10	Гетерогенные ядерные реакторы.	8	11		20	39	ПСК-1.9 ПСК-1.10 ПК-7
	11	Особенности различных энергетических реакторов	3	4		15	22	ПК-6 ПСК-1.9
ИТОГО:			52	55		181	288	

#### 4.2 Содержание дисциплины

*В разделе приводится полный перечень дидактических единиц, подлежащих усвоению при изучении данной дисциплины, структурированный по видам занятий и темам в рамках разделов дисциплины. Номер раздела дисциплины и объем часов приводится в соответствии с Таблицей 4.2.*

Удельный вес проводимых в активных и интерактивных формах проведения аудиторных занятий по дисциплине составляет не менее 30 %.

Таблица 4.3

№ лекции	Номер раздела	Тема лекции и перечень дидактических единиц*	Трудоемкость, акад. часов	
			всего	в том числе с использованием интерактивных образовательных технологий
1	1	Производство энергии. Источники энергии. Запасы органического топлива.	1	
2	1	Ресурсы по реакциям деления и синтеза. Перспективы развития ядерной энергетики.	1	
3	2	Определение и простейшая реализация ядерного реактора. Вероятность избежать утечки.	1	1
4	2	Типичные реакции ( $U + n$ ), выход и энергия нейтронов, эффективный коэффициент размножения, режимы реактора.	1	
5	2	Условия работы реактора, деление и конвертирование ядер изотопов урана и тория. Коэффициент воспроизводства.	1	
6	2	Классификация реакторов: по энергии нейтронов, по назначению, по ядерному горючему, по структуре активной зоны, по теплоносителю, по отражателю, по замедлителю. Схема реактора.	1	1
7	3	Механизм ядерных реакций, каналы реакций, ядерные уровни энергий, спектры для ядер различной массы, ширина уровня.	1	
8	3	Резонансное поглощение, формула Брэйта-Вигнера для зависимости сечений взаимодействия от энергии нейтронов.	1	
9	3	Неупругое рассеяние, резонансное и потенциальное упругое рассеяние.	1	1
10	3	Замедление нейтронов, тепловое равновесие, требование к материалу замедлителя.	1	
11	4	Определение сечения, плотность тока нейтронов. Полное сечение.	1	
12	4	Сечения: упругого и неупругого рассеяния, поглощения, деления, увода, полное замедления, интегральное радиационного захвата.	1	1
13	4	Концентрация ядер. Скорость реакции, поток нейтронов.	1	
14	4	Ослабление тока нейтронов, макросечения взаимодействия, аддитивность, длина свободного пробега.	1	
15	5	Выход реакций. Поток нейтронов. Основные свойства реакций деления, осколки деления.	1	1
16	5	Мгновенные и запаздывающие нейтроны. Спектр нейтронов деления. Схема типичного распада с запаздывающими нейтронами ( $K_{\Gamma}^{87}$ )	3	
17	5	Механизм деления ядер, критическая энергия и энергия связи, пороговая энергия деления. Продукты деления. Баланс освобождающейся энергии. Условия стационарной реакции деле-	1	

		ния. Цепная реакция деления (ЦР). Коэффициент размножения $K$ реактора бесконечных размеров. Коэффициент размножения на быстрых нейтронах (БН).		
18	5	Вероятность избежать резонансного захвата. Коэффициент теплового использования. Формула четырех сомножителей.	1	1
19	5	Обогащение топлива для поддержания ЦР. Примеры сечений для $C^{12}$ , $B^{10}$ , $U^{235}$ , $U^{238}$ . Возможность расширенного воспроизводства делящихся изотопов. Бридеры. Коэффициент воспроизводства для различных типов реакторов.	1	
20	6	Утечка нейтронов. Схема баланса нейтронов в реакторе на тепловых нейтронах (ТН) конечных размеров.	1	
21	6	Действие запаздывающих нейтронов. Распределение нейтронов в реакторе.	1	1
22	6	Граничное условие. Замедление в бесконечных средах, основные процессы. Упругое рассеяние. Вероятность приобретения энергии в некотором интервале $dE$ . Средний косинус угла рассеяния.	1	
23	6	Логарифмический декремент энергии. Коэффициент замедления. Летаргия.	1	
24	6	Энергетический спектр замедляемых нейтронов. Замедление в водороде без поглощения. Спектр Ферми. Плотность замедления. Замедление без поглощения в неводородных средах, модель непрерывного замедления.	1	1
25	6	Примеры реальных спектров в реакторах на ТН и БН. Замедление в бесконечных средах при наличии поглощения, вероятность избежать резонансного захвата в водородных средах и средах с массовыми числами $A > 1$ . Эффективный резонансный интеграл. Эффект Доплера, уширение пиков макросечений.	1	
26	7	Плотность тока нейтронов. Закон Фика.	1	
27	7	Коэффициент диффузии, транспортное сечение рассеяния. Уравнение диффузии.	1	1
28	7	Граничные условия, экстраполированная граница. Точечный источник в бесконечной среде. Бесконечный плоский источник. Длина диффузии. Альбеда, таблица значений для $H_2O$ , $D_2O$ , $Be$ , $C$ .	1	
29	7	Реактор без отражателя в одноструйном приближении. Материальный и геометрический параметры. Теория возраста.	1	
30	7	Уравнение диффузии с учетом замедления, уравнение возраста. Точечный источник БН в бесконечной среде. Физический смысл возраста. Время диффузии и время замедления.	1	1
31	7	Гомогенный реактор без отражателя на ТН. Система уравнений диффузии и возраста. Собственные значения и собственные функции. Волновое уравнение. Условие критичности ( $B_G$ и $B_M$ ). Вероятность избежать утечки. Геометрические параметры шаровидного и цилиндрического реакторов.	1	



32	8	Оценка критических размеров ядерных реакторов. Большие реакторы. Площадь миграции. Экспериментальное определение критических размеров.	1	
33	8	Гомогенный реактор с отражателем, свойства отражателя, распределение нейтронов в реакторе с отражателем и его критические размеры (решение для пластины). Эффективная добавка отражателя. Временной режим реактора без отражателя на ТН.	1	1
34	8	Период реактора. Уравнение диффузии с учетом запаздывающих нейтронов. Реактивность. Анализ решения. Малые и большие реактивности. Вес. Управление реактором.	1	
35	8	Нарушение нейтронного баланса. Классификация регулирующих стержней (компенсирующие, РР, АР, АЗ). Вес стержня в цилиндрическом реакторе при слабом возмущении, влияние стержня на утечку.	1	
36	9	Изменение изотопического состава ядерного горючего. Отравление реактора продуктами деления. Стационарная плотность ядер $\text{Xe}^{135}$ . Величина отравления.	1	1
37	9	Накопление ксенона после останова реактора. Иодная яма. Зашлаковывание, потери в шлаках, коэффициент выгорания, группы шлаков. Последовательное поглощение нейтронов ( $\text{Sm Eu}$ ), сумма потерь в шлаках.	1	
38	9	Изменение реактивности при выгорании горючего и его воспроизводстве. КВ для природного состава урана. Глубина выгорания топлива. Условия осуществления ядерного взрыва. Нейтронная бомба.	1	
39	9	Температурный коэффициент реактивности. Изменение реактивности по мере выгорания топлива. Теория возмущений в эффективном одногрупповом приближении. Коэффициент квадратичного усреднения. Эффективность регулятора от глубины погружения.	1	1
40	10	Особенности гетерогенных систем. Главные эффекты размещения урана в виде блоков (блок-эффекты)		
41	10	Вычисление коэффициента размножения для гетерогенных систем: коэффициент теплового использования, коэффициент проигрыша, коэффициент размножения на БН, вероятность избежать резонансного захвата.		
42	10	Особенности реактора на БН.		1
43	10	Энергонапряженность: (ВВЭР, ВВРК, ГГР, РБМК, БН, жидкотопливные).		
44	10	Тепловыделение. Действие облучения на материалы реактора.		
45	10	Радиационный рост урана. Распухание урана при облучении. Коэффициенты радиационного роста и распухания.		1
46	10	Структурирование топлива для снижения указанных эффектов. Топливо ядерных реакторов. Расширенное воспроизводство, время удвоения.		

		Электроядерный бридинг.		
47	10	Переработка ТВЭЛов (химический способ, электрохимический - хлоридный и фторидный). Флюенс. Плутониевое накопление.		
48	11	Водо-водяные энергетические реакторы (ВВЭР). Нейтронно-физические особенности. Основные направления совершенствования ВВЭР. Оценочный расчет коэффициента размножения.		1
49	11	Водо-водяные кипящие реакторы (ВК). Нейтронно-физические особенности. Сравнение характеристик реакторов типа ВК и ВВЭР. Канальные реакторы. Нейтронно-физические особенности и оценочный расчет канальных реакторов.		1
50	11	Реакторы на быстрых нейтронах. Основные нейтронно-физические особенности. Особенности нейтронно-физического расчета.		
Итого:			52	15

*\*Перечень дидактических единиц определяется кафедрой-разработчиком*

### Практические занятия

*Приводится перечень занятий семинарского типа, их краткое содержание, объем или делается запись: «учебным планом не предусмотрены».*

Таблица 4.4

№ лекции	Номер раздела	Тема лекции и перечень дидактических единиц*	Трудоемкость, акад. часов	
			всего	в том числе с использованием интерактивных образовательных технологий
1	1	Производство энергии. Источники энергии. Запасы органического топлива.	1	
2	1	Ресурсы по реакциям деления и синтеза. Перспективы развития ядерной энергетики.	1	
3	2	Определение и простейшая реализация ядерного реактора. Вероятность избежать утечки.	1	1
4	2	Типичные реакции ( $U + n$ ), выход и энергия нейтронов, эффективный коэффициент размножения, режимы реактора.	1	
5	2	Условия работы реактора, деление и конвертирование ядер изотопов урана и тория. Коэффициент воспроизводства.	1	
6	2	Классификация реакторов: по энергии нейтронов, по назначению, по ядерному горючему, по структуре активной зоны, по теплоносителю, по отражателю, по замедлителю. Схема реактора.	1	1
7	3	Механизм ядерных реакций, каналы реакций, ядерные уровни энергий, спектры для ядер различной массы, ширина уровня.	1	
8	3	Резонансное поглощение, формула Брэгга-Вигнера для зависимости сечений взаимодействия от энергии нейтронов.	1	
9	3	Неупругое рассеяние, резонансное и потенциальное упругое рассеяние.	1	1

10	3	Замедление нейтронов, тепловое равновесие, требование к материалу замедлителя.	1	
11	4	Определение сечения, плотность тока нейтронов. Полное сечение.	1	
12	4	Сечения: упругого и неупругого рассеяния, поглощения, деления, увода, полное замедления, интегральное радиационного захвата.	1	1
13	4	Концентрация ядер. Скорость реакции, поток нейтронов.	1	
14	4	Ослабление тока нейтронов, макросечения взаимодействия, аддитивность, длина свободного пробега.	1	
15	5	Выход реакций. Поток нейтронов. Основные свойства реакций деления, осколки деления.	1	1
16	5	Мгновенные и запаздывающие нейтроны. Спектр нейтронов деления. Схема типичного распада с запаздывающими нейтронами ( $K_{gr}^{87}$ )	1	
17	5	Механизм деления ядер, критическая энергия и энергия связи, пороговая энергия деления. Продукты деления. Баланс освобождающейся энергии. Условия стационарной реакции деления. Цепная реакция деления (ЦР). Коэффициент размножения $K$ реактора бесконечных размеров. Коэффициент размножения на быстрых нейтронах (БН).	1	
18	5	Вероятность избежать резонансного захвата. Коэффициент теплового использования. Формула четырех сомножителей.	1	1
19	5	Обогащение топлива для поддержания ЦР. Примеры сечений для $C^{12}$ , $B^{10}$ , $U^{235}$ , $U^{238}$ . Возможность расширенного воспроизводства делящихся изотопов. Бридеры. Коэффициент воспроизводства для различных типов реакторов.	1	
20	6	Утечка нейтронов. Схема баланса нейтронов в реакторе на тепловых нейтронах (ТН) конечных размеров.	1	
21	6	Действие запаздывающих нейтронов. Распределение нейтронов в реакторе.	1	1
22	6	Граничное условие. Замедление в бесконечных средах, основные процессы. Упругое рассеяние. Вероятность приобретения энергии в некотором интервале $dE$ . Средний косинус угла рассеяния.	1	
23	6	Логарифмический декремент энергии. Коэффициент замедления. Летаргия.	1	
24	6	Энергетический спектр замедляемых нейтронов. Замедление в водороде без поглощения. Спектр Ферми. Плотность замедления. Замедление без поглощения в неводородных средах, модель непрерывного замедления.	1	1
25	6	Примеры реальных спектров в реакторах на ТН и БН. Замедление в бесконечных средах при наличии поглощения, вероятность избежать резонансного захвата в водородных средах и средах с массовыми числами $A > 1$ . Эффективный резонансный интеграл.	1	

		Эффект Доплера, уширение пиков макросечений.		
26	7	Плотность тока нейтронов. Закон Фика.	1	
27	7	Коэффициент диффузии, транспортное сечение рассеяния. Уравнение диффузии.	1	1
28	7	Граничные условия, экстраполированная граница. Точечный источник в бесконечной среде. Бесконечный плоский источник. Длина диффузии. Альбе-до, таблица значений для $H_2O$ , $D_2O$ , $Be$ , $C$ .	1	
29	7	Реактор без отражателя в однокрупном приближении. Материальный и геометрический параметры. Теория возраста.	1	
30	7	Уравнение диффузии с учетом замедления, уравнение возраста. Точечный источник БН в бесконечной среде. Физический смысл возраста. Время диффузии и время замедления.	1	1
31	7	Гомогенный реактор без отражателя на ТН. Система уравнений диффузии и возраста. Собственные значения и собственные функции. Волновое уравнение. Условие критичности ( $V_T$ и $V_M$ ). Вероятность избежать утечки. Геометрические параметры шаро-видного и цилиндрического реакторов.	1	
32	8	Оценка критических размеров ядерных реакто-ров. Большие реакторы. Площадь миграции. Экспе-риментальное определение критических размеров.	1	
33	8	Гомогенный реактор с отражателем, свойства от-ражателя, распределение нейтронов в реакторе с от-ражателем и его критические размеры (решение для пластины). Эффективная добавка отражателя. Вре-менной режим реактора без отражателя на ТН.	1	1
34	8	Период реактора. Уравнение диффузии с учетом запаздывающих нейтронов. Реактивность. Анализ решения. Малые и большие реактивности. Вес. Управление реактором.	1	
35	8	Нарушение нейтронного баланса. Классификация регулирующих стержней (компенсирующие, РР, АР, АЗ). Вес стержня в цилиндрическом реакторе при слабом возмущении, влияние стержня на утечку.	1	
36	9	Изменение изотопического состава ядерного го-рючего. Отравление реактора продуктами деления. Стационарная плотность ядер $He^{135}$ . Величина отрав-ления.	1	1
37	9	Накопление ксенона после останова реактора. Иодная яма. Зашлаковывание, потери в шлаках, ко-эффициент выгорания, группы шлаков. Последова-тельное поглощение нейтронов ( $Sm$ $Eu$ ), сумма по-терь в шлаках.	1	
38	9	Изменение реактивности при выгорании горюче-го и его воспроизводстве. КВ для природного соста-ва урана. Глубина выгорания топлива. Условия осу-ществления ядерного взрыва. Нейтронная бомба.	1	
39	9	Температурный коэффициент реактивности. Из-менение реактивности по мере выгорания топлива. Теория возмущений в эффективном однокрупном приближении. Коэффициент квадратичного усред-	1	1

		нения. Эффективность регулятора от глубины погружения.		
40	10	Особенности гетерогенных систем. Главные эффекты размещения урана в виде блоков (блок-эффекты)	1	
41	10	Вычисление коэффициента размножения для гетерогенных систем: коэффициент теплового использования, коэффициент проигрыша, коэффициент размножения на БН, вероятность избежать резонансного захвата.	1	
42	10	Особенности реактора на БН.		1
43	10	Энергонапряженность: (ВВЭР, ВВРК, ГГР, РБМК, БН, жидкотопливные).		
44	10	Тепловыделение. Действие облучения на материалы реактора.		
45	10	Радиационный рост урана. Распухание урана при облучении. Коэффициенты радиационного роста и распухания.		1
46	10	Структурирование топлива для снижения указанных эффектов. Топливо ядерных реакторов. Расширенное воспроизводство, время удвоения. Электроядерный бридинг.		
47	10	Переработка ТВЭЛов (химический способ, электрохимический - хлоридный и фторидный). Флюенс. Плутониевое накопление.		
48	11	Водо-водяные энергетические реакторы (ВВЭР). Нейтронно-физические особенности. Основные направления усовершенствования ВВЭР. Оценочный расчет коэффициента размножения.		
49	11	Водо-водяные кипящие реакторы (ВК). Нейтронно-физические особенности. Сравнение характеристик реакторов типа ВК и ВВЭР. Канальные реакторы. Нейтронно-физические особенности и оценочный расчет канальных реакторов.	1	
50	11	Реакторы на быстрых нейтронах. Основные нейтронно-физические особенности. Особенности нейтронно-физического расчета.	1	
51	11	Последовательность нейтронно-физического расчета реактора.		
Итого:			55	15

### Лабораторные работы

Приводится перечень лабораторных, их краткое содержание, объем или делается запись: «учебным планом не предусмотрены».

Таблица 4.5

№ занятия	Номер раздела	Наименование лабораторной работы и перечень дидактических единиц	Трудоемкость, акад. часов	
			всего	в том числе с использованием интерактивных образовательных технологий
		<i>Учебным планом не предусмотрены</i>		
Итого:				

## Самостоятельная работа студента

Таблица 4.6

Раздел дисциплины	№ п/п	Вид самостоятельной работы студента (СРС) и перечень дидактических единиц	Трудоемкость, часов
1	1.1	Производство энергии. Источники энергии.	6
	1.2	Запасы органического топлива, ресурсы по реакциям деления и синтеза.	6
2	2.1	Определение и простейшая реализация ядерного реактора. Вероятность избежать утечки.	6
	2.2	Условия работы реактора, деление и конвертирование ядер изотопов урана и тория. Коэффициент воспроизводства.	4
	2.3	Классификация реакторов	4
3	3.1	Механизм ядерных реакций	4
	3.2	Резонансное поглощение	6
	3.3	Неупругое рассеяние, резонансное и потенциальное упругое рассеяние	4
	3.4	Замедление нейтронов, тепловое равновесие	4
4	4.1	Определение сечения, плотность тока нейтронов	5
	4.2	Полное сечение реакции	4
	4.3	Макросечения взаимодействия	5
5	5.1	Поток нейтронов. Основные свойства реакций деления, осколки деления.	4
	5.2	Мгновенные и запаздывающие нейтроны. Спектр нейтронов деления.	4
	5.3	Коэффициент размножения $K$ реактора бесконечных размеров.	4
	5.4	Возможность расширенного воспроизводства делящихся изотопов	4
6	6.1	Утечка нейтронов. Схема баланса нейтронов в реакторе	4
	6.2	Действие запаздывающих нейтронов.	4
	6.3	Энергетический спектр замедляемых нейтронов. Замедление в водороде без поглощения	4
	6.4	Примеры реальных спектров в реакторах на ТН и БН	4
7	7.1	Плотность тока нейтронов. Закон Фика.	4
	7.2	Уравнение диффузии. Граничные условия, экстраполированная граница.	4
	7.3	Реактор без отражателя в одноструйном приближении.	4
	7.4	Физический смысл возраста. Время диффузии и время замедления.	4
	7.5	Собственные значения и собственные функции. Волновое уравнение.	4
8	8.1	Оценка критических размеров ядерных реакторов.	4
	8.2	Гомогенный реактор с отражателем, свойства отражателя.	4
	8.3	Эффективная добавка отражателя. Временной режим реактора без отражателя на ТН.	4
	8.4	Управление реактором.	4
9	9.1	Изменение изотопического состава ядерного горючего.	4
	9.2	Стационарная плотность ядер $^{135}\text{Xe}$ . Величина отравления.	4
	9.3	Иодная яма.	4

	9.4	КВ для природного состава урана. Глубина выгорания топлива.	4
10	10.1	Главные эффекты размещения урана в виде блоков (блок-эффекты).	4
	10.2	Вычисление коэффициента размножения для гетерогенных систем.	4
	10.3	Тепловыделение. Действие облучения на материалы реактора.	4
	10.4	Распухание урана при облучении. Коэффициенты радиационного роста и распухания.	4
	10.5	Структурирование топлива для снижения указанных эффектов. Топливо ядерных реакторов.	4
	10.6	Расширенное воспроизводство, время удвоения.	4
11	11.1	Водо-водяные энергетические реакторы (ВВЭР).	4
	11.2	Водо-водяные кипящие реакторы (ВК).	3
	11.3	Канальные реакторы.	4
	11.4	Реакторы на быстрых нейтронах.	4
<b>ИТОГО:</b>			<b>181</b>

**Домашние задания, типовые расчеты и т.п.** *(при наличии в учебном плане)*

Учебным планом не предусмотрены

**Рефераты** *(при наличии в учебном плане)*

Учебным планом не предусмотрены

**Курсовые работы (проекты) по дисциплине** *(при наличии в учебном плане)*

*Учебным планом не предусмотрены*

## **5 ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

В ходе освоения дисциплины при проведении аудиторных занятий используются следующие образовательные технологии: лекции, практические занятия с использованием активных и интерактивных форм проведения занятий.

Интерактивное обучение реализуется как диалоговое обучение в ходе лекционных и практических занятий, что позволяет осуществлять взаимодействие между студентом и преподавателем, а также между самими студентами.

При выполнении практических работ преподаватель занимается лишь общей организацией и регулированием процесса интерактивного взаимодействия студентов в бригадах, на которые разбивается студенческая группа. Преподаватель, кроме того, готовит заранее необходимые задания и формулирует вопросы для успешной реализации заданий, даёт консультации, контролирует время и порядок выполнения намеченного плана практического занятия. При решении задач практического занятия, студентам приходится вступать в коммуникацию друг с другом, совместно решать поставленные задачи, преодолевать конфликты, находить общие точки соприкосновения, идти на компромиссы. В результате, практические занятия позволяют интегрировать теоретические знания и практические умения.

Достижение планируемых результатов освоения дисциплины осуществляется за счет использования следующих образовательных технологий:

1. Информационные технологии – при применении компьютеров для использования электронных версий учебников, учебных пособий, методических указаний, журнальных статей и нормативной документации;

2. Работа в команде – совместная деятельность студентов в группе под руководством лидера, направленная на решение общей задачи путем творческого сложения результатов индивидуальной работы членов команды.

3. Case-study - анализ реальных проблемных ситуаций, имевших место в ядерной энергетике и поиск вариантов лучших решений..

На всех видах контроля студент должен продемонстрировать стандартные профессиональные действия за счет самостоятельного добывания необходимых знаний, умений и компетенций для конкретной и ранее неизвестной ситуации, возникающей при эксплуатации реакторной техники

Применяются вопросы с ветвлением допустимых решений, задачи на формирование прогноза, т.е. предполагаемых изменений в исходном объекте: «Что будет, если сделать то-то?».

При организации самостоятельной работы занятий используются методы самоуправляемой и самоконтролируемой познавательной деятельности через методы и технологии решения задач динамики и безопасности ЯЭУ.

## **6 ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ВХОДНОГО И ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ, ПРОМЕЖУТОЧНОЙ И ИТОГОВОЙ АТТЕСТАЦИИ (АННОТАЦИЯ)**

Контроль освоения дисциплины производится в соответствии с Положением о рейтинговой системе оценки знаний студентов ДИТИ НИЯУ МИФИ.

**Текущий контроль** студентов производится в дискретные временные интервалы лектором и преподавателем (ями), ведущими практические занятия по дисциплине в следующих формах:

- тестирование;
- устные и письменные опросы;
- отдельно оцениваются личностные качества студента (аккуратность, исполнительность, инициативность) – работа у доски, своевременная сдача тестов.

**Промежуточный контроль** студентов производится в следующих формах:

- тестирование;
- коллоквиумы;
- другие

**Итоговый контроль** по результатам семестров по дисциплине проходит в форме письменного экзамена (включает в себя ответ на теоретические вопросы и/или решения задач), зачета

Фонды оценочных средств, включающие типовые задания, контрольные работы, тесты и методы контроля, позволяющие оценить результаты обучения по данной дисциплине, перечислены в Приложении.

## **7 УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

### **7.1 Перечень основной и дополнительной учебной литературы**

*(Указывается перечень внутривузовской и внешней литературы. В качестве внутривузовской литературы должны быть указаны: электронный конспект, методические указания к лабораторным работам и т.д.).*

*В перечень основной литературы включаются издания, имеющиеся в фондах библиотеки ДИТИ НИЯУ МИФИ (в электронно-библиотечной системе и (или) библиотеке ДИТИ НИЯУ МИФИ).*

*Если издания в электронно-библиотечных системах отсутствуют, то имеющиеся в книжном фонде библиотеки ДИТИ НИЯУ МИФИ издания должны быть в наличии не менее 50 экземпляров каждого из изданий основной литературы, перечисленной в рабочих программах дисциплин, на 100 обучающихся и не менее 25 экземпляров дополнительной литературы на 100 обучающихся.*

*Список дополнительной литературы может включать следующие типы изданий: учебники; учебные пособия; справочно-библиографическую литературу: отраслевые энциклопедии, отраслевые справочники (по профилю образовательной программы), отраслевые словари (по профилю образовательной программы), библиографические пособия; научную литературу. Список пе-*



риодических изданий должен включать перечень необходимых журналов по профилю дисциплины, имеющихся в библиотеке.

**В обязательном порядке следует указывать ссылки на ресурсы электронных библиотечных систем, доступных для использования в ДИТИ НИЯУ МИФИ!**

Таблица 7.1 - Обеспечение дисциплины основной и дополнительной литературой по дисциплине

№ п/п	Автор	Название	Место издания	Наименование издательства	Год издания	Количество экземпляров
<b>Основная литература</b>						
1	Дементьев Б.А.	Кинетика и регулирование ядерных реакторов.	Москва	Энергоатомиздат	1986	2
2	Галанин А.Д.	Теория ядерных реакторов на тепловых нейтронах.	Москва	Атомиздат	1959	1
<b>Дополнительная литература</b>						
1	Окунев В.С.	Нейтронно-физический расчет решетки ядерного реактора на основе газокинетической теории переноса.	Москва	Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана	2011	1
2	Савандер, В.И	Физическая теория ядерных реакторов [Электронный ресурс] : учебное пособие для вузов / В. И. Савандер, М. А. Увакин. - Москва : МИФИ. Ч.1 : Однородная размножающая среда и теория гетерогенных структур : учебное пособие для вузов,	Москва	НИЯУ МИФИ	2007	1

## 7.2 Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»

1. <http://www.ditud.ru:2525/> (Электронная библиотека Димитровградского института технологии, управления и дизайна)
2. [library.mephi.ru/](http://library.mephi.ru/) (Электронно-библиотечная система НИЯУ МИФИ)
3. [lanbook.com/ebs.php](http://lanbook.com/ebs.php) (Электронно-библиотечная система издательства «Лань»)

## 7.3 Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (при необходимости)

Чтение лекций с использованием слайд-презентаций и графических объектов, выводимых на экран при проведении занятий всех форм.

## 8 МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

### 1. Лекционные занятия:

- комплект электронных презентаций/слайдов,
- аудитория, оснащенная презентационной техникой (проектор, экран, компьютер/ноутбук);

- наглядные пособия в виде отдельных электронных изделий.
2. Практические занятия (семинарского типа):
- аудитория, оснащенная презентационной техникой (проектор, экран, компьютер/ноутбук);
  - пакеты ПО общего назначения (текстовые редакторы, графические редакторы),
3. Прочее:
- рабочее место преподавателя, оснащенное компьютером с доступом в Интернет,

## 9 ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ КАРТА ДИСЦИПЛИНЫ

### Семестр 6

Информация о контр. точках	Текущий контроль(<=25) (ТК)							Промежуточный контроль (<=30) (ПК)		Форма итогового контроля
	ТК <sub>1</sub>	ТК <sub>2</sub>	ТК <sub>3</sub>	ТК <sub>4</sub>	ТК <sub>5</sub>	ТК <sub>6</sub>	ТК <sub>7</sub>	ПК <sub>1</sub>	ПК <sub>2</sub>	
форма контроля	ПЗ	ПЗ	ПЗ	ПЗ	ПЗ	ПЗ	ПЗ	Тест	Тест	Зачет
неделя сдачи	4	6	8	10	12	14	16	8	16	
макс. балл	5	6	4	5	2	6	2	15	15	

### Семестр 7

Информация о контр. точках	Текущий контроль(<=25) (ТК)							Промежуточный контроль (<=30) (ПК)		Форма итогового контроля
	ТК <sub>1</sub>	ТК <sub>2</sub>	ТК <sub>3</sub>	ТК <sub>4</sub>	ТК <sub>5</sub>	ТК <sub>6</sub>	ТК <sub>7</sub>	ПК <sub>1</sub>	ПК <sub>2</sub>	
форма контроля	ПЗ	ПЗ	ПЗ	ПЗ	ПЗ	ПЗ	ПЗ	Тест	Тест	Зачет
неделя сдачи	4	6	8	10	12	14	16	8	16	
макс. балл	5	6	4	5	2	6	2	15	15	

### Семестр 8

Информация о контр. точках	Текущий контроль(<=25) (ТК)							Промежуточный контроль (<=30) (ПК)		Форма итогового контроля
	ТК <sub>1</sub>	ТК <sub>2</sub>	ТК <sub>3</sub>	ТК <sub>4</sub>	ТК <sub>5</sub>	ТК <sub>6</sub>	ТК <sub>7</sub>	ПК <sub>1</sub>	ПК <sub>2</sub>	
форма контроля	ПЗ	ПЗ	ПЗ	ПЗ	ПЗ	ПЗ	ПЗ	Тест	Тест	Экзамен
неделя сдачи	4	6	8	10	12	14	16	8	16	
макс. балл	5	6	4	5	2	6	2	15	15	

**Структура баллов, начисляемых студентам по результатам текущего контроля и промежуточного контроля**

№ п/п	Наименование видов учебной работы	Начисляемое количество баллов (долей баллов)	Максимальное количество баллов по данному виду учебной работы
1	<b>Раздел 1</b>	2	
	<b>Текущий контроль 1:</b> а) выполнение теоретических заданий		2
2	<b>Раздел 2</b>		
	<b>Текущий контроль 2:</b> а) выполнение теоретических заданий б) выполнение практических работ	3	3
3	<b>Раздел 3</b>	9	
	<b>Текущий контроль 3:</b> а) выполнение теоретических заданий б) выполнение практических работ	3	3
	Посещение лекций	0,4балла за лекцию	4
	Посещение практических занятий	0,3 балла занятие	3
4	<b>Промежуточный контроль по разделам 1-3.</b>	<b>15</b>	<b>15</b>
5	<b>Раздел 4</b>	2	
	<b>Текущий контроль 4:</b> а) выполнение теоретических заданий б) выполнение практических работ	4	8
6	<b>Разделы 5</b>		
	<b>Текущий контроль 5:</b> а) выполнение теоретических заданий б) выполнение практических работ	3	6
7	Посещение лекций	0,4 балла за лекцию	2
8	Посещение практических занятий	0,4 балла за занятие	2

9	<b>Промежуточный контроль</b> разделам 4-5	<b>18</b>	<b>18</b>
	<b>Разделы 6-7</b>		
10	<b>Текущий контроль 3:</b> а) выполнение теоретических заданий б) выполнение практических работ	8	8
	<b>Раздел 8</b>		
11	<b>Текущий контроль 8:</b> а) выполнение теоретических заданий б) выполнение практических работ в) выполнение расчетно-графических работ	6	6
	Посещение лекций	0,4балла за лекцию	4
	Посещение практических занятий	0,4 балла занятие	4
12	<b>Промежуточный контроль</b> разделам 6-8	<b>22</b>	<b>22</b>
13	<b>ИТОГО БАЛЛОВ ЗА СЕМЕСТР:</b>		<b>55</b>

**Дополнения и изменения в рабочей программе  
дисциплины на 20\_\_/20\_\_ уч.г.**

Внесенные изменения на 20\_\_/20\_\_ учебный год

**УТВЕРЖДАЮ**

Декан \_\_\_\_\_ факультета

\_\_\_\_\_  
*(в состав которого входит кафедра-составитель)*

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_ г.

В рабочую программу вносятся следующие изменения:

- 1) .....
- 2) .....

или делается отметка о нецелесообразности внесения каких-либо изменений на данный учебный год

Рабочая программа пересмотрена на заседании кафедры

\_\_\_\_\_  
*(дата, номер протокола заседания кафедры, подпись зав. кафедрой).*

**СОГЛАСОВАНО:**

Заведующий выпускающей кафедрой

\_\_\_\_\_  
*наименование кафедры      личная подпись      расшифровка подписи      дата*

Декан

\_\_\_\_\_  
*наименование факультета, где производится обучение,      личная подпись      расшифровка подписи      дата*

Начальник УМУ

\_\_\_\_\_  
*личная подпись      расшифровка подписи      дата*

### **Аннотация рабочей программы**

Дисциплина Физическая теория реакторов является частью базовой частью профессионального модуля дисциплин подготовки студентов по направлению подготовки 14.05.01 Ядерные реакторы и материалы. Дисциплина реализуется на физико-техническом факультете ДИТИ НИЯУ МИФИ кафедрой «Ядерные реакторы и материалы».

Дисциплина нацелена на формирование профессиональных компетенций ПК-1, ПК-2, ПК-3, ПК-7, ПК-25, ПК-29, ПСК -1.6, ПСК-1.7, ПСК-1.9, ПСК-1.12 выпускника.

Содержание дисциплины охватывает круг вопросов, связанных с нейтронно-физическими и теплогидравлическими процессами в активных зонах, сопровождающих работу реактора, а также вопросы управления и безопасности ядерных энергетических установок.

Преподавание дисциплины предусматривает следующие формы организации учебного процесса: лекции, практические занятия, коллоквиумы, самостоятельная работа студента, консультации.

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля: текущий контроль успеваемости в форме тестирования, устных и письменных вопросов, промежуточный контроль в форме коллоквиумов и тестирования и итоговый контроль в форме зачета и экзамена.

Общая трудоемкость освоения дисциплины составляет 9 зачетных единиц, 288 часов. Программой дисциплины предусмотрены лекционные (50), практические (51) занятия и (187) самостоятельной работы студента.

### **Методические указания для самостоятельной работы обучающихся**

При изучении данного курса предполагается наличие у студента знаний в рамках стандартного курса ядерной физики и методов решения линейных дифференциальных уравнений. Хотя учебники по данной дисциплине имеются, тем не менее конспектирование большинства лекций необходимо последующей причине: комплекс знаний, излагаемых в данном курсе, охватывает более широкий круг вопросов, чем каждая из рекомендованных пособий, и в то же время изложение материала построено на упрощенном подходе, позволяющем студенту более легкое освоение материала без искажения качественной стороны вопросов.

Посещение семинаров необходимо для приобретения навыка решения практических задач динамики реакторов (в каждом экзаменационном билете есть такая задача). Для более глубокого изучения и самостоятельной работы лучше использовать рекомендуемую литературу.

Интернет имеет хороший ресурс информации только по ядерной энергетике (например, сайты <http://www.icjt.org/nukestat/index.html>, <http://www.world-nuclear.org/education/whyu.htm>) и др.); по физике реакторов есть англоязычные сайты, например, <http://www.nephy.chalmers.se/staff-pages/demaz/new/teaching/>; на русском языке

подходящих сайтов динамике и безопасности ядерных реакторов не имеется.

Для наглядного представления материала при чтении лекций используется около 300 слайдов. После каждой лекции можно получить у лектора электронные копии использованных слайдов. Кроме того, студентам предоставляются твердые копии таблиц, данных и графиков с данными, необходимыми при решении задач.

По каждой теме рекомендуется иметь краткий конспект основных положений, терминов, сведений, требующих запоминания.

Владение курсом общей физики и квантовой механики, крайне желательно владение английским языком. Самостоятельное решение предлагаемых задач на качественное понимание учебного материала.

### Фонд оценочных средств дисциплины

#### Вопросы для подготовки к зачету и экзамену по дисциплине «Физическая теория реакторов»

1. Типичные источники и счетчики нейтронов, используемые при пуске ядерного реактора (ЯР).
2. Вид кривой обратного счета при "удачном" расположении счетчиков.
3. Умножение, подкритичность. Может ли подкритичность превышать единицу.
4. Связь между установившимися параметрами и параметрами источника.
5. Как ведет себя плотность потока нейтронов в подкритическом и критическом ЯР при наличии источников и после его удаления.
6. При какой подкритичности на время установления существенно влияет время запаздывания нейтронов.
7. Как по изменению подкритичной мощности и высвобождаемой реактивности определить подкритичность ЯР при его пуске.
8. Что произойдет с ЯР при очередном освобождении реактивности, если в предыдущем освобождении такой же реактивности подкритическая мощность возросла в два раза.
9. Эффективная доля запаздывающих нейтронов; от чего зависит ценность запаздывающих нейтронов; чему равно время запаздывания для урана-235 и плутония-239.
10. Усредненное время жизни поколения нейтронов в ЯР.
11. Как изменяется ценность запаздывающих нейтронов с уменьшением размеров активной зоны; в каком случае ценность фотонейтронов сравнима с ценностью запаздывающих.
12. Поведение ЯР при реактивности, равной эффективной доле запаздывающих нейтронов; чему равна реактивность при работе ЯР на постоянном уровне мощности.
13. Как ведет себя соотношение плотностей запаздывающих и мгновенных нейтронов при введении положительной и отрицательной реактивности; что происходит быстрее: увеличение или уменьшение плотности потока нейтронов при одинаковом по абсолютному значению скачке реактивности (положительном и отрицательном).
14. Чем определяется скорость спада мощности ЯР через две-три минуты после его перевода в подкритическое состояние.
15. Играют ли роль запаздывающие нейтроны при работе ЯР на стационарном уровне мощности; чему равны эффективный коэффициент размножения и реактивность в этом случае.
16. Перечислите регламентные режимы эксплуатации ЯР и их определяющие характеристики.
17. Реактивность, пределы регулирования ЯР по реактивности, запас реактивности.
18. Подкритичность на мгновенных нейтронах.
19. Динамика изменения мощности при мгновенном изменении реактивности от нулевого значения в положительную и отрицательную стороны.
20. Связь подкритичности и умножения; как ведет себя ЯР с плутониевым топливом при реактивности равной или большей  $+0.003$ .
21. Как изменить реактивность от нулевого значения (регламент), чтобы увеличить/снизить мощность в течение определенного промежутка времени и поддерживать ее затем на постоянном уровне.



22. Как ведет себя начальная скорость увеличения плотности потока нейтронов по мере приближения ЯР к критичности.
23. Как ведет себя время установления при приближении к критичности, чему оно равно при Кэфф. равном единице; чему равен период реактора при работе на постоянном уровне мощности.
24. Указать характерное значение запаса реактивности; потери реактивности за счет температурного и мощностного эффектов, за счет накопления продуктов деления равновесной концентрации, за счет выгорания и шлакования для быстрых и тепловых ЯР.
25. Функция линейного отклика, что она определяет.
26. Указать три основных вида регулирования реактивности; чем осуществляется активный и пассивный способ компенсации реактивности.
27. Физический вес (компенсирующая способность) регулирующего стержня; условие, которому должен удовлетворять физический вес всех компенсирующих стержней в ЯР без выгорающих поглотителей.
28. Дифференциальная характеристика компенсирующего стержня и единицы ее измерения.
29. Допустимая скорость высвобождения реактивности.
30. Как определить допустимый шаг перемещения компенсирующего стержня при работающей и неработающей пусковой аппаратуре; как определить допустимую скорость подъема компенсирующего стержня.
31. Для чего служит стержень автоматического регулирования, какому условию должен удовлетворять его физический вес, какое его положение в активной зоне является рабочим. Какому условию должен удовлетворять физический вес стержней аварийной защиты.
32. Из чего складывается изменение запаса реактивности с момента известного критического положения компенсирующих стержней до момента очередного пуска ЯР.
33. Что может произойти если текущая концентрация борной кислоты отличается от расчетной при пуске ЯР.
34. Из какого расчета определяется топливных кассет (ТК) в первой, третьей и следующих партиях при загрузке "свежей" активной зоны; начиная с какого момента загрузку ведут по одной ТК; какому условию должна удовлетворять скорость погружения ТК в технологический канал.
35. На какие диапазоны разбивается интервал мощности при пуске ЯР.
36. Из какого условия выбирается скорость высвобождения реактивности при пуске ЯР; способы увеличения безопасности пуска ЯР.
37. После какого положения компенсирующих стержней можно и каким образом сократить время пуска ЯР.
38. Как определить скорость погружения компенсирующего стержня, обеспечивающую постоянство мощности ЯР при увеличении реактивности с постоянной скоростью.
39. Каким должен быть физический вес стержня автоматического регулирования при эффективной доле запаздывающих нейтронов 0,007, чтобы он, находясь в рабочем положении, мог компенсировать быстрое увеличение реактивности, приводящее к скачку мощности на 20% от текущего значения.
40. Указать шаг подъема и время выдержки регулировочной кассеты ЯР ВВЭР-440 в неконтролируемом диапазоне мощности.
41. Указать основные условия ядерной безопасности при пуске ЯР; в каком случае при пуске можно увеличить скорость высвобождения реактивности выше регламентной; какой прибор первым регистрирует выход ЯР на минимальный контролируемый уровень мощности.
42. Перечислить основные составляющие системы управления и защиты (СУЗ) реактора ВВЭР.

43. Причины появления и последствия сигналов аварийной защиты первого рода в реакторах ВВЭР; какова скорость движения стержней СУЗ вниз "самоходом" для ВВЭР.
44. Как определить скорость ввода отрицательной реактивности при движении стержней СУЗ вниз.
45. Указать предупредительные и аварийные уставки аварийной защиты реакторов ВВЭР в различных диапазонах мощности.
46. Сколько групп стержней СУЗ ЯР ВВЭР–440 и с какой скоростью опускаются в активную зону по предупредительной уставке; чем определяется эффективность групп стержней СУЗ.
47. Указать диапазоны нейтронной мощности при пуске ЯР и регистрирующие камеры, используемые в них.
48. Как определить запас реактивности ЯР при известных температуре активной зоны, концентрации борной кислоты и всех опущенных группах стержней СУЗ; из какого условия выбирается пусковая группа стержней СУЗ.
49. Какой диапазон разогрева активной зоны ЯР с точки зрения ядерной безопасности опасен при пуске; что происходит с реактивностью при охлаждении активной зоны при отрицательном температурном коэффициенте реактивности.
50. Указать признаки нарушения режима естественной циркуляции теплоносителя.
51. Какие подсистемы включает СУЗ ЯР РБМК–1000(1500) и каковы их функции; указать уставки срабатывания системы аварийной защиты по сигналам пятого рода для ЯР РБМК–1000(1500) по периоду (в диапазоне мощности до 160 МВт и в остальном диапазоне).
52. Какие стержни используются для регулирования высотных полей в ЯР РБМК–1000(1500); с какой скоростью вводятся стержни в его активную зону при срабатывании аварийной защиты по сигналам пятого рода.
53. По какой причине ограничен нижний предел оперативного запаса реактивности; в чем измеряется оперативный запас реактивности в ЯР РБМК–1000(1500); какова скорость ввода отрицательной реактивности в данном ЯР при срабатывании системы аварийной защиты по сигналам пятого рода.
54. К чему приводит увеличение паросодержания в активной зоне ЯР РБМК–1000(1500) на номинальной мощности; в каком случае допускается отключение системы аварийного охлаждения в ЯР РБМК–1000(1500).
55. Перечислить хронологию допущения ошибок и нарушений, а также их содержание и последствия, оперативным персоналом при развитии событий, приведших к аварии на четвертом блоке Чернобыльской АЭС; перечислить основные технические решения, принятые для повышения безопасности эксплуатации реакторов типа РБМК.

Приложение 4  
к рабочей программе дисциплины  
«Физическая теория реакторов»

## I. Образовательные технологии

Преподавание дисциплины ведется с применением следующих видов образовательных технологий.

**Коммуникативное обучение:** чтение лекций, изложение нового материала с использованием традиционных форм преподавания, наглядных пособий и презентаций (*разделы 1-3*).

**Информационные технологии:** использование электронных образовательных ресурсов при подготовке к лекциям и практическим занятиям (*разделы 1-3*).

**Работа в команде:** совместная работа студентов в группе при выполнении групповых домашних заданий (*разделы 2, 3*).

## II. Виды и содержание учебных занятий

### Раздел 1. Введение

Теоретические занятия (лекции) - 2 час.

#### Лекция 1.

Производство энергии. Источники энергии. Запасы органического топлива.

Ресурсы по реакциям деления и синтеза. Перспективы развития ядерной энергетики.

*Тип лекции: информационная лекция.*

### Раздел 2. Основные понятия теории ядерных реакторов

Теоретические занятия (лекции) - 4 час.

#### Лекция 2.

Определение и простейшая реализация ядерного реактора. Вероятность избежать утечки.

Типичные реакции ( $U + n$ ), выход и энергия нейтронов, эффективный коэффициент размножения, режимы реактора.

#### Лекция 3.

Условия работы реактора, деление и конвертирование ядер изотопов урана и тория. Коэффициент воспроизводства. Классификация реакторов: по энергии нейтронов, по назначению, по ядерному горючему, по структуре активной зоны, по теплоносителю, по отражателю, по замедлителю. Схема реактора.

*Тип лекции: информационная лекция.*

### Раздел 3. Ядерные процессы в реакторах

Теоретические занятия (лекции) - 4 час.

#### Лекция 4.

Механизм ядерных реакций, каналы реакций, ядерные уровни энергий, спектры для ядер различной массы, ширина уровня. Резонансное поглощение, формула Брэйта-Вигнера для зависимости сечений взаимодействия от энергии нейтронов.

#### Лекция 5.

Неупругое рассеяние, резонансное и потенциальное упругое рассеяние. Замедление нейтронов, тепловое равновесие, требование к материалу замедлителя.

*Тип лекции: информационная лекция.*

### Раздел 4. Нейтронные поперечные сечения

Теоретические занятия (лекции) - 4 час.

#### Лекция 6.

Определение сечения, плотность тока нейтронов. Полное сечение. Сечения: упругого и неупругого рассеяния, поглощения, деления, увода, полное замедления, интегральное радиационного захвата.

### Лекция 7.

Концентрация ядер. Скорость реакции, поток нейтронов. Ослабление тока нейтронов, макросечения взаимодействия, аддитивность, длина свободного пробега.

*Тип лекции: информационная лекция.*

## Раздел 5. Нейтронные реакции

Теоретические занятия (лекции) - 5 час.

### Лекция 8.

Выход реакций. Поток нейтронов. Основные свойства реакций деления, осколки деления. Мгновенные и запаздывающие нейтроны. Спектр нейтронов деления. Схема типичного распада с запаздывающими нейтронами ( $Kr^{87}$ )

### Лекция 9.

Механизм деления ядер, критическая энергия и энергия связи, пороговая энергия деления. Продукты деления. Баланс освобождающейся энергии. Условия стационарной реакции деления. Цепная реакция деления (ЦР). Коэффициент размножения  $K$  реактора бесконечных размеров. Коэффициент размножения на быстрых нейтронах (БН).

### Лекция 10.

Вероятность избежать резонансного захвата. Коэффициент теплового использования. Формула четырех сомножителей. Обогащение топлива для поддержания ЦР. Примеры сечений для  $C^{12}$ ,  $B^{10}$ ,  $U^{235}$ ,  $U^{238}$ . Возможность расширенного воспроизводства делящихся изотопов. Бридеры. Коэффициент воспроизводства для различных типов реакторов.

*Тип лекции: информационная лекция.*

Практические занятия - 8 часа.

### Занятие 1.

Определение и простейшая реализация ядерного реактора. Вероятность избежать утечки. Типичные реакции ( $U + n$ ), выход и энергия нейтронов, эффективный коэффициент размножения, режимы реактора.

### Занятие 2.

Условия работы реактора, деление и конвертирование ядер изотопов урана и тория. Коэффициент воспроизводства.

### Занятие 3.

Механизм ядерных реакций, каналы реакций, ядерные уровни энергий, спектры для ядер различной массы, ширина уровня.

### Занятие 4.

Неупругое рассеяние, резонансное и потенциальное упругое рассеяние. Замедление нейтронов, тепловое равновесие, требование к материалу замедлителя. Сечения: упругого и неупругого рассеяния, поглощения, деления, увода, полное замедления, интегральное радиационного захвата.

## Раздел 6. Модели рассеяния и спектры нейтронов

Теоретические занятия (лекции) - 6 час.

### Лекция 11.

Утечка нейтронов. Схема баланса нейтронов в реакторе на тепловых нейтронах (ТН) конечных размеров. Действие запаздывающих нейтронов. Распределение нейтронов в реакторе.

### Лекция 12.

Граничное условие. Замедление в бесконечных средах, основные процессы. Упругое рассеяние. Вероятность приобретения энергии в некотором интервале  $dE$ . Средний косинус угла рассеяния. Логарифмический декремент энергии. Коэффициент замедления. Летаргия.

### Лекция 13.

Энергетический спектр замедляемых нейтронов. Замедление в водороде без поглощения. Спектр Ферми. Плотность замедления. Замедление без поглощения в неводородных средах, модель непрерывного замедления. Примеры реальных спектров в реакторах на ТН и БН. Замедление в бесконечных средах при наличии поглощения, вероятность избежать резонансного захвата в водородных средах и средах с массовыми числами  $A > 1$ . Эффективный резонансный интеграл. Эффект Доплера, уширение пиков макросечений.

*Тип лекции: информационная лекция.*

## **Практические занятия - 8 часа.**

### **Занятие 5.**

Механизм деления ядер, критическая энергия и энергия связи, пороговая энергия деления. Продукты деления. Баланс освобождающейся энергии. Условия стационарной реакции деления. Цепная реакция деления (ЦР). Коэффициент размножения **K** реактора бесконечных размеров. Коэффициент размножения на быстрых нейтронах (БН).

### **Занятие 6.**

Вероятность избежать резонансного захвата. Коэффициент теплового использования. Формула четырех сомножителей. Граничное условие. Замедление в бесконечных средах, основные процессы. Упругое рассеяние. Вероятность приобретения энергии в некотором интервале  $dE$ . Средний косинус угла рассеяния.

### **Занятие 7.**

Обогащение топлива для поддержания ЦР. Примеры сечений для  $C^{12}$ ,  $B^{10}$ ,  $U^{235}$ ,  $U^{238}$ . Возможность расширенного воспроизводства делящихся изотопов. Бридеры. Коэффициент воспроизводства для различных типов реакторов.

### **Занятие 8.**

Утечка нейтронов. Схема баланса нейтронов в реакторе на тепловых нейтронах (ТН) конечных размеров. Действие запаздывающих нейтронов. Распределение нейтронов в реакторе.

## **Раздел 7. Диффузия нейтронов**

### **Теоретические занятия (лекции) - 6 час.**

#### **Лекция 14.**

Плотность тока нейтронов. Закон Фика. Коэффициент диффузии, транспортное сечение рассеяния. Уравнение диффузии.

#### **Лекция 15.**

Граничные условия, экстраполированная граница. Точечный источник в бесконечной среде. Бесконечный плоский источник. Длина диффузии. Альbedo, таблица значений для  $H_2O$ ,  $D_2O$ ,  $Be$ ,  $C$ . Реактор без отражателя в одногрупповом приближении. Материальный и геометрический параметры. Теория возраста.

#### **Лекция 16.**

Уравнение диффузии с учетом замедления, уравнение возраста. Точечный источник БН в бесконечной среде. Физический смысл возраста. Время диффузии и время замедления. Гомогенный реактор без отражателя на ТН. Система уравнений диффузии и возраста. Собственные значения и собственные функции. Волновое уравнение. Условие критичности ( $V_T$  и  $V_M$ ). Вероятность избежать утечки. Геометрические параметры шаровидного и цилиндрического реакторов.

*Тип лекции: информационная лекция.*

## **Практические занятия - 8 часа.**

### **Занятие 9.**

Примеры реальных спектров в реакторах на ТН и БН. Замедление в бесконечных средах при наличии поглощения, вероятность избежать резонансного захвата в водородных средах и средах с массовыми числами  $A > 1$ . Эффективный резонансный интеграл. Эффект Доплера, уширение пиков макросечений.

### **Занятие 10.**

Плотность тока нейтронов. Закон Фика. Коэффициент диффузии, транспортное сечение рассеяния. Уравнение диффузии. Граничные условия, экстраполированная граница. Точечный источник в бесконечной среде. Бесконечный плоский источник. Длина диффузии. Альbedo, таблица значений для  $H_2O$ ,  $D_2O$ ,  $Be$ ,  $C$ .

### **Занятие 11.**

Реактор без отражателя в одногрупповом приближении. Материальный и геометрический параметры. Теория возраста. Уравнение диффузии с учетом замедления, уравнение возраста. Точечный источник БН в бесконечной среде. Физический смысл возраста. Время диффузии и время замедления.

### **Занятие 12.**

Гомогенный реактор без отражателя на ТН. Система уравнений диффузии и возраста. Собственные значения и собственные функции. Волновое уравнение. Условие критичности ( $V_T$  и  $V_M$ ). Вероятность избежать утечки. Геометрические параметры шаровидного и цилиндрического реакторов.

## **Раздел 8. Критический размер и управление реактором**

**Теоретические занятия (лекции) - 4 час.**

### **Лекция 17.**

Оценка критических размеров ядерных реакторов. Большие реакторы. Площадь миграции. Экспериментальное определение критических размеров. Гомогенный реактор с отражателем, свойства отражателя, распределение нейтронов в реакторе с отражателем и его критические размеры (решение для пластины). Эффективная добавка отражателя. Временной режим реактора без отражателя на ТН.

### **Лекция 18.**

Период реактора. Уравнение диффузии с учетом запаздывающих нейтронов. Реактивность. Анализ решения. Малые и большие реактивности. Вес. Управление реактором. Нарушение нейтронного баланса. Классификация регулирующих стержней (компенсирующие, РР, АР, АЗ). Вес стержня в цилиндрическом реакторе при слабом возмущении, влияние стержня на утечку.

*Тип лекции: информационная лекция.*

**Практические занятия - 6 часа.**

### **Занятие 13.**

Оценка критических размеров ядерных реакторов. Большие реакторы. Площадь миграции. Экспериментальное определение критических размеров. Гомогенный реактор с отражателем, свойства отражателя, распределение нейтронов в реакторе с отражателем и его критические размеры (решение для пластины). Эффективная добавка отражателя. Временной режим реактора без отражателя на ТН.

### **Занятие 14.**

Период реактора. Уравнение диффузии с учетом запаздывающих нейтронов. Реактивность. Анализ решения. Малые и большие реактивности. Вес. Управление реактором.

### **Занятие 15.**

Нарушение нейтронного баланса. Классификация регулирующих стержней (компенсирующие, РР, АР, АЗ). Вес стержня в цилиндрическом реакторе при слабом возмущении, влияние стержня на утечку.

## **Раздел 9. Изменение состава горючего и реактивности.**

**Теоретические занятия (лекции) - 4 час.**

### **Лекция 19.**

Изменение изотопического состава ядерного горючего. Отравление реактора продуктами деления. Стационарная плотность ядер  $\text{Xe}^{135}$ . Величина отравления. Накопление ксенона после останова реактора. Иодная яма. Зашлаковывание, потери в шлаках, коэффициент выгорания, группы шлаков. Последовательное поглощение нейтронов ( $\text{Sm}$   $\text{Eu}$ ), сумма потерь в шлаках.

### **Лекция 20.**

Изменение реактивности при выгорании горючего и его воспроизводстве. КВ для природного состава урана. Глубина выгорания топлива. Условия осуществления ядерного взрыва. Нейтронная бомба. Температурный коэффициент реактивности. Изменение реактивности по мере выгорания топлива. Теория возмущений в эффективном одnogрупповом приближении. Коэффициент квадратичного усреднения. Эффективность регулятора от глубины погружения.

*Тип лекции: информационная лекция.*

**Практические занятия - 6 часа.**

### **Занятие 16.**

Изменение реактивности при выгорании горючего и его воспроизводстве. КВ для природного состава урана. Глубина выгорания топлива. Условия осуществления ядерного взрыва. Нейтронная бомба.

Изменение изотопического состава ядерного горючего. Отравление реактора продуктами де-

ления. Стационарная плотность ядер  $\text{Xe}^{135}$ . Величина отравления.

#### **Занятие 17.**

Накопление ксенона после останова реактора. Иодная яма. Зашлаковывание, потери в шлаках, коэффициент выгорания, группы шлаков. Последовательное поглощение нейтронов ( $\text{Sm Eu}$ ), сумма потерь в шлаках.

#### **Занятие 18.**

Температурный коэффициент реактивности. Изменение реактивности по мере выгорания топлива. Теория возмущений в эффективном одnogрупповом приближении. Коэффициент квадратичного усреднения. Эффективность регулятора от глубины погружения.

### **Раздел 10. Гетерогенные ядерные реакторы**

#### **Теоретические занятия (лекции) - 8 час.**

##### **Лекция 21.**

Особенности гетерогенных систем. Главные эффекты размещения урана в виде блоков (блок-эффекты) Вычисление коэффициента размножения для гетерогенных систем: коэффициент теплового использования, коэффициент проигрыша, коэффициент размножения на БН, вероятность избежать резонансного захвата.

##### **Лекция 22.**

Особенности реактора на БН. Энергонапряженность: (ВВЭР, ВВРК, ГГР, РБМК, БН, жидкотопливные).

##### **Лекция 23.**

Тепловыделение. Действие облучения на материалы реактора. Радиационный рост урана. Распухание урана при облучении. Коэффициенты радиационного роста и распухания.

##### **Лекция 24.**

Структурирование топлива для снижения указанных эффектов. Топливо ядерных реакторов. Расширенное воспроизводство, время удвоения. Электроядерный бридинг. Переработка ТВЭЛов (химический способ, электрохимический - хлоридный и фторидный). Флюенс. Плутониевое накопление.

*Тип лекции: информационная лекция.*

#### **Практические занятия - 11 часа.**

##### **Занятие 19.**

Особенности гетерогенных систем. Главные эффекты размещения урана в виде блоков (блок-эффекты)

##### **Занятие 20.**

Вычисление коэффициента размножения для гетерогенных систем: коэффициент теплового использования, коэффициент проигрыша, коэффициент размножения на БН, вероятность избежать резонансного захвата.

##### **Занятие 21.**

Температурный коэффициент реактивности. Изменение реактивности по мере выгорания топлива. Теория возмущений в эффективном одnogрупповом приближении. Коэффициент квадратичного усреднения. Эффективность регулятора от глубины погружения.

##### **Занятие 22.**

Особенности расчета реактора на БН. Энергонапряженность: (ВВЭР, ВВРК, ГГР, РБМК, БН, жидкотопливные). Тепловыделение. Действие облучения на материалы реактора.

##### **Занятие 23.**

Радиационный рост урана. Распухание урана при облучении. Коэффициенты радиационного роста и распухания. Структурирование топлива для снижения указанных эффектов. Топливо ядерных реакторов. Расширенное воспроизводство, время удвоения. Электроядерный бридинг.

### **Раздел 11. Особенности различных энергетических реакторов**

#### **Теоретические занятия (лекции) - 3 час.**

##### **Лекция 25.**

Водо-водяные энергетические реакторы (ВВЭР). Нейтронно-физические особенности. Основные направления усовершенствования ВВЭР. Оценочный расчет коэффициента размножения. Водо-водяные кипящие реакторы (ВК). Нейтронно-физические особенности. Сравнение характе-

ристик реакторов типа ВК и ВВЭР. Канальные реакторы. Нейтронно-физические особенности и оценочный расчет канальных реакторов. Реакторы на быстрых нейтронах. Основные нейтронно-физические особенности. Особенности нейтронно-физического расчета.

*Тип лекции: информационная лекция.*

**Практические занятия - 4 часа.**

**Занятие 24.**

Водо-водяные энергетические реакторы (ВВЭР). Нейтронно-физические особенности. Основные направления усовершенствования ВВЭР. Оценочный расчет коэффициента размножения.

**Занятие 25.**

Водо-водяные кипящие реакторы (ВК). Нейтронно-физические особенности. Сравнение характеристик реакторов типа ВК и ВВЭР. Канальные реакторы. Нейтронно-физические особенности и оценочный расчет канальных реакторов.

**Занятие 26.**

Реакторы на быстрых нейтронах. Основные нейтронно-физические особенности. Особенности нейтронно-физического расчета. Последовательность нейтронно-физического расчета реактора.