

Балаковский инженерно-технологический институт – филиал федерального  
государственного автономного образовательного учреждения высшего образования  
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Факультет атомной энергетики и технологий  
Кафедра «Физика и естественнонаучные дисциплины»

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА**  
по дисциплине «Физика ядерных реакторов»

**Специальность**  
«14.05.02 Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг»

**Основная профессиональная образовательная программа**  
«Системы контроля и управления атомных станций»

**Квалификация выпускника**  
Инженер-физик

**Форма обучения**  
Очная

Балаково

**Цель освоения дисциплины** является формирование у студентов представлений, знаний, умений и навыков в области основы теории и методов анализа нейтронно-ядерных процессов, протекающих в ядерных реакторах.

**Задачи изучения дисциплины:**

- получение студентами знаний по основным вопросам физической теории ядерных реакторов (теория критических размеров, теория гетерогенного реактора, физика нестационарных процессов в ядерных реакторах);
- ознакомление с методами физического расчета ядерных реакторов разных типов, физического реакторного эксперимента.

Дисциплина изучается в соответствии с профессиональными стандартами:

- 24.032. Специалист в области теплоэнергетики (реакторное отделение);
- 24.033. Специалист в области контрольно-измерительных приборов и автоматики атомной станции.

**Место дисциплины в структуре ООП ВО**

Изучение дисциплины «Физика ядерных реакторов» требует основных компетенций, знаний, умений и навыков обучающегося, сформировавшихся при обучении по дисциплинам:

- теория переноса нейтронов;
- ядерная физика;
- уравнения математической физики;
- линейная алгебра.

В ходе изучения дисциплины «Физика ядерных реакторов» обучающийся получает знания, умения и навыки для успешного изучения следующих дисциплин: «Динамика ядерных реакторов»; «Ядерные энергетические реакторы».

Обобщенные трудовые функции, которые сможет полностью или частично продемонстрировать студент при освоении данной дисциплины:

- в соответствии с профессиональным стандартом «24.032. Специалист в области теплоэнергетики (реакторное отделение)»: В/01.7. Обеспечение взаимодействия в процессе инженерно-технической поддержки при эксплуатации реакторного оборудования, технологических систем, основных фондов реакторного отделения АЭС;
- в соответствии с профессиональным стандартом «24.033. Специалист в области контрольно-измерительных приборов и автоматики атомной станции»: С/01.7. Организация и контроль выполнения производственным подразделением работ по обеспечению эксплуатации СИ, СА и аппаратуры СУЗ на АС.

**Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины**  
обще профессиональные

Код компетенции	Наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1	Способен использовать базовые знания естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования,	З-ОПК-1 Знать: базовые законы естественнонаучных дисциплин; основные математические законы; основные физические явления, процессы, законы и границы их применимости; сущность основных химических законов и явлений; методы математического моделирования, теоретического и экспериментального исследования У-ОПК-1 Уметь: выявлять естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе

	теоретического и экспериментального исследования	профессиональной деятельности, привлекать для их решения соответствующий физико-математический аппарат В-ОПК-1 Владеть: математическим аппаратом для разработки моделей процессов и явлений, решения практических задач профессиональной деятельности; навыками использования основных общезначимых законов и принципов
--	--	--

профессиональные

Задачи профессиональной деятельности (ЗПД)	Объект или область знания	Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
Анализ процессов в ядерных энергетических установках с целью обеспечения их эффективной и безопасной работы; обеспечение ядерной и радиационной безопасности при эксплуатации ядерных энергетических установок, а также при обращении с ядерным топливом и радиоактивными отходами на АЭС (и ЯЭУ).	Современная электронная схемотехника, электронные системы ядерных и физических установок, системы автоматизированного управления ядерно - физическими установками. Ядерные, химические и тепловые процессы, протекающие в ядерных энергетических установках и на атомных станциях.	ПК-9 Способен анализировать нейтронно-физические, технологические процессы и алгоритмы контроля, управления и защиты ЯЭУ с целью обеспечения их эффективной и безопасной работы	З-ПК-9 Знать правила и нормы в атомной энергетике, критерии эффективной и безопасной работы ЯЭУ; У-ПК-9 уметь анализировать нейтронно-физические, технологические процессы и алгоритмы контроля, управления и защиты ЯЭУ; В-ПК-9 владеть методами анализа нейтронно-физических и технологических процессов в ЯЭУ.

### Задачи воспитания, реализуемые в рамках освоения дисциплины

Направление/ цели	Создание условий, обеспечивающих	Использование воспитательного потенциала учебных дисциплин	Вовлечение в разноплановую внеучебную деятельность
<b>Профессиональное и трудовое воспитание</b>	- формирование глубокого понимания социальной роли профессии, позитивной и активной установки на ценности	Использование воспитательного потенциала дисциплин естественнонаучного и общепрофессионального модуля для: - формирования позитивного отношения к профессии инженера (конструктора,	1. Организация научно-практических конференций и встреч с ведущими специалистами предприятий города и ветеранами атомной отрасли.

	избранной специальности, ответственного отношения к профессиональной деятельности, труду <b>(B14)</b>	технолога), понимания ее социальной значимости и роли в обществе, стремления следовать нормам профессиональной этики посредством контекстного обучения, решения практико-ориентированных ситуационных задач. - формирования устойчивого интереса к профессиональной деятельности, способности критически, самостоятельно мыслить, понимать значимость профессии посредством осознанного выбора тематики проектов, выполнения проектов с последующей публичной презентацией результатов, в том числе обоснованием их социальной и практической значимости; - формирования навыков командной работы, в том числе реализации различных проектных ролей (лидер, исполнитель, аналитик и пр.) посредством выполнения совместных проектов.	2. Организация и проведение предметных олимпиад и участие в конкурсах профессионального мастерства. 3. Участие в ежегодных акциях студенческих строительных отрядов
<b>Профессиональное и трудовое воспитание</b>	- формирование психологической готовности к профессиональной деятельности по избранной профессии <b>(B15)</b>	Использование воспитательного потенциала дисциплин общепрофессионального модуля для: - формирования устойчивого интереса к профессиональной деятельности, потребности в достижении результата, понимания функциональных обязанностей и задач избранной профессиональной деятельности, чувства профессиональной ответственности через выполнение учебных, в том числе практических заданий, требующих строгого соблюдения правил техники безопасности и инструкций по работе с оборудованием в рамках лабораторного практикума.	1. Организация научно-практических конференций и встреч с ведущими специалистами предприятий города и ветеранами атомной отрасли. 2. Организация и проведение предметных олимпиад и участие в конкурсах профессионального мастерства. 3. Участие в ежегодных акциях студенческих строительных отрядов

## Структура и содержание учебной дисциплины

Дисциплина преподается студентам в 7-ом семестре. Общая трудоемкость дисциплины составляет 3 зачетных единицы, 108 ак. часа.

### Календарный план

№ раздела	№ темы	Наименование раздела/темы дисциплины	Виды учебной деятельности (час.)					Аттестация раздела (форма)	Максимальный балл за раздел
			Всего	Лекции	Лабораторные	Практические	СРС		
1		<b>Физическая классификация ядерных реакторов и нейтронный цикл</b>			-			УО	20
	1	Введение.	4	2		-	2		
	2	Ядерный реактор как источник энерговыделения	6	2	-	2	2		
	3	Физические свойства реакторных материалов и сред	6	2	-	2	2		
	4	Нейтронный цикл в тепловом ядерном реакторе	6	2	-	2	2		
2		<b>Теория критических размеров и элементы теории решетки</b>						УО	20
	5	Гомогенный ядерный реактор как исходная модель для расчета гетерогенного ядерного реактора	4	2	-	-	2		
	6	Условие критичности для гомогенного ядерного реактора без отражателя. Критические размеры гомогенных голых реакторов различной геометрии	6	2	-	2	2		
	7	Гомогенный реактор с отражателем в однокрупном приближении. Эквивалентный реактор	6	2	-	2	2		
	8	Гомогенный реактор с отражателем в двухкрупном приближении, методы выравнивания поля энерговыделения в активной зоне ядерного реактора	8	2	-	2	4		
	9	Основы метода вероятности первых столкновений (ВПС). Расчет коэффициентов и параметров	8	2	-	4	2		
3		<b>Нейтроннофизические процессы в ядерных реакторах</b>						УО	20
	10	Температурные эффекты в ядерных реакторах	8	2	-	2	4		
	11	Эффекты реактивности	8	2	-	2	4		
	12	Выгорание и воспроизводство ядерного топлива	8	2	-	4	4		

13	Нейтронно-физические особенности водо-водяных энергетических реакторов. Нейтронно-физические особенности водо-графитовых энергетических реакторов	6	2	-	-	4		
14	Нейтронно-физические особенности газографитовых энергетических реакторов. Нейтронно-физические особенности реакторов на быстрых нейтронах. Особенности работы на МОКС-топливе	6	2	-	-	4		
15	Шлакование и отравление ядерного реактора. Нестационарное отравление (переотравление) ядерного реактора ксеноном. Отравление ядерного реактора самарием-149	16	4	-	8	4		
	Экзамен							40
<b>ИТОГО</b>		<b>108/16</b>	<b>32</b>	<b>-</b>	<b>32/16</b>	<b>44</b>		<b>100</b>

### Содержание лекционного курса

Темы лекции. Вопросы, отрабатываемые на лекции	Всего часов	Учебно-методическое обеспечение
1	2	3
<b>Введение.</b> Место дисциплины среди специальных дисциплин специальности АЭС. Структура курса. Курс «Теория переноса нейтронов» как теоретическая база физики ядерных реакторов. Повторение.	2	1-4
<b>Ядерный реактор как источник энерговыделения.</b> Ядерная энергетика: современное состояние и тенденции развития. Проблемы ядерной энергетики. Сырьевые (воспроизводящее, пороговыми, делимые) нуклиды. Топливные или делящиеся нуклиды. Механизм образования тепла в ядерном реакторе. Принципы работы и возможные составляющие активной зоны ядерного реактора (ЯР). Классификация ЯР по различным параметрам, классификация ЯР МАГАТЭ. Одно-, двух- и трехконтурные АЭС и их особенности. Четыре условных поколения ядерных реакторов. Тенденции развития в реакторостроении. Новые проекты ядерных реакторов. Урановый и ториевый топливный цикл.	2	1-4
<b>Физические свойства реакторных материалов и сред.</b> Нейтронно-физические характеристики топливных и сырьевых нуклидов (U-233, U-235, U-238, Th-232, Pu-239, Pu-240, Pu-241, Pu-242). МОКС-топливо. Нейтронно-физические свойства поглотителей (B-10, Gd-157, Xe-135, Sm-149, Eu, Er). Требования, предъявляемые к замедлителям, и нейтронно-физические и другие свойства замедлителей (H <sub>2</sub> O, D <sub>2</sub> O, C, Be, BeO). Достоинства и недостатки применяемых замедлителей. Неупругое рассеяние на ядрах среды и его пороговый характер. Требования, предъявляемые к теплоносителям, и нейтронно-физические и другие свойства теплоносителей (H <sub>2</sub> O, D <sub>2</sub> O, Na, K, Li, Pb+Bi,	2	1-4

CO <sub>2</sub> , Ar, He, N, воздух). Достоинства и недостатки применяемых теплоносителей.		
<b>Нейтронный цикл в тепловом ядерном реакторе.</b> Нейтронный цикл в тепловом ядерном реакторе. Время замедления и время диффузии нейтронов. Время жизни поколения. Физический смысл и значение (для ВВЭР-1000) множителей формулы 4-х сомножителей. Утечка нейтронов. Вероятность избежать утечки при замедлении. Вероятность избежать утечки при диффузии. Баланс нейтронов. Эффективный коэффициент размножения нейтронов для бесконечной и конечной сред. Реактивность. Единицы измерения реактивности. Влияние изменения линейных размеров гомогенного ядерного реактора на $k_{эф}$ и реактивность (качественное объяснение).	2	1-4
<b>Гомогенный ядерный реактор как исходная модель для расчета гетерогенного ядерного реактора.</b> Гомо- и гетерогенный ядерный реактор. Коэффициенты формулы четырех сомножителей для гомо- и гетерогенного ядерного реактора. Расчет гомогенизированных ядерных концентраций в ячейке (гомогенизация ячейки). Коэффициент использования тепловых нейтронов для гомо- и гетерогенного ЯР. Фактор проигрыша. Вероятность избежать резонансного захвата на уране-238 для гомо- и гетерогенного ЯР. Эффективный и истинный резонансный интеграл поглощения. Вероятность избежать резонансного захвата на уране-238 для гомо- и гетерогенного ЯР. Эффективный и истинный резонансный интеграл поглощения. Фактор самоэкранирования. Зависимости $\phi$ и $\theta$ от диаметра топливной таблетки (типа реактора – гомо-гетеро). Критерии гомогенности (гетерогенности). Физические особенности гетерогенных ядерных реакторов. Влияние соотношения «замедлитель-топливо» (водо-уранового) соотношения на внешний и внутренний блок-эффекты и на эффективный коэффициент размножения нейтронов в ядерном реакторе. Количественные характеристики блок-эффектов.	2	1-4
<b>Условие критичности для гомогенного ядерного реактора без отражателя. Критические размеры гомогенных голых реакторов различной геометрии</b> Общая методика решения диф. уравнения диффузии для активной зоны ядерного реактора. Решение волнового уравнения (задача Штурма-Лиувилля). Материальный и геометрический параметры и их величины, их соотношение в реакторе. Условие критичности для гомогенного голого ядерного реактора конечных размеров., 2 час. Критические размеры гомогенных голых реакторов различной геометрии, их геометрические параметры, распределение плотности потока нейтронов (пластина, сфера, параллелепипед, цилиндр). Критическая масса и критический объем. Минимальный критический объем гомогенного голого реактора различной геометрии. Коэффициенты неравномерности нейтронного потока (поля энерговыделения) для гомогенного голого реактора конечных размеров различной геометрии (пластина, сфера, параллелепипед, цилиндр).	2	1-4
<b>Гомогенный реактор с отражателем в одnogрупповом приближении. Эквивалентный реактор. Утечка нейтронов.</b>	2	1-4

<p>Функции отражателя. Гомогенный реактор с отражателем в однокрупновом приближении. Граничные и краевые условия. Методика получения условия критичности в однокрупновом приближении. Тонкий и толстый отражатель, бесконечно толстый отражатель. Эффективная добавка отражателя. Гомогенный реактор в однокрупновом приближении в виде пластины с отражателем и цилиндра с боковым (торцевым) отражателем. Эквивалентный реактор. Эффективные размеры активной зоны. Понятие «большого» или «малого» ЯР с точки зрения размеров и величины утечки нейтронов из активной зоны ядерного реактора (качественное объяснение).</p>		
<p><b>Гомогенный реактор с отражателем в двухкрупновом приближении, методы выравнивания поля энерговыделения в активной зоне ядерного реактора.</b> Гомогенный реактор с отражателем в двухкрупновом приближении. Граничные и краевые условия. Методика получения условия критичности в двухкрупновом приближении. Распределение тепловых нейтронов в отражателе. Неравномерность поля энерговыделения и методы выравнивания поля энерговыделения в активной зоне ядерного реактора. Коэффициенты неравномерности поля энерговыделения в ядерном реакторе и способы их уменьшения. Физическое профилирование в многозонном ядерном реакторе. Картограмма топливной загрузки ядерного реактора. Метод многих групп. Выбор числа групп. Многокрупновое уравнение для плотности потока нейтронов, смысл его слагаемых. Многокрупновое уравнение для плотности потока нейтронов и методика решения. Нормировка констант на удельную тепловую мощность реактора. Подготовка групповых констант. Функция ценности нейтронов. Метод одной и многих групп. Многокрупновое уравнение для ценности, смысл его слагаемых и методика решения. Выбор числа групп. Особенности подготовки многокрупновых констант. Свертка многокрупновых констант для малокрупновых приближений.</p>	2	1-4
<p><b>Основы метода вероятности первых столкновений (ВПС). Расчет коэффициентов и параметров.</b> Гетерогенный реактор и его физические особенности. Классификация решеток. Простая и сложная решетки. Элементарная ячейка Вигнера-Зайца. Условия зеркального и диффузионного отражения на границах ячейки. Основные понятия метода ВПС. Соотношения между вероятностями. Простые и сложные вероятности. основные приближения и допущения. Тесная и разреженная решетка. Рациональное приближение Вигнера. Приближение Белла. Формула Зауэра. Учет перекрестного эффекта в тесных решетках. Коэффициенты "затенения" решетки. Применение метода вероятности первых столкновений (ВПС) для расчета различных решеток. Расчет коэффициента размножения на быстрых нейтронах методом ВПС. Зависимость этого коэффициента от параметров решетки и ее компонентов. Резонансное поглощение в гетерогенной среде. Поверхностная блокировка резонансного поглощения. Расчет эффективного резонансного интеграла методом ВПС. Условие эквивалентности резонансного поглощения в гетерогенной и гомогенной средах.</p>	2	1-4



Основные положения и теоремы теории ядерных реакторов. Расчет коэффициента использования тепловых нейтронов в диффузионном приближении в двухзонной и трехзонной ячейках. Метод Амуаяля, Бенуа, Горовица (метод АБГ). Расчет длины диффузии и возраста нейтронов в решетке. Влияние параметров решетки на коэффициент размножения.		
<b>Температурные эффекты в ядерных реакторах.</b> Влияние температуры на геометрические размеры и нейтронно-физические свойства реакторных материалов и сред. Влияние изменения температуры на коэффициенты формулы 4-х сомножителей и на утечку нейтронов из реактора – влияние изменения температуры на эффективный коэффициент размножения нейтронов в активной зоне ядерного реактора.	2	1-4
<b>Эффекты реактивности.</b> Обратные связи в ядерном реакторе. Эффект реактивности как интегральная характеристика. Коэффициент реактивности как дифференциальная характеристика. Температурный эффект и температурный коэффициент реактивности (ТЭР и ТКР). Ядерный и плотностной ТЭР. Мощностной эффект и коэффициент реактивности (МЭР и МКР). Барометрический и паровой эффекты и коэффициенты реактивности. Саморегулирование ядерных реакторов. Требования ядерной безопасности к знаку и величинам (соотношению) ТЭР и МЭР, ТКР и МКР. Их значения для реальных реакторов (их топливных загрузок). Разогрев активной зоны ядерного реактора от стороннего источника тепла при переводе реактора из «холодного» в «горячее» состояние. Эффекты реактивности в процессе снижения мощности и расхолаживания ядерного реактора. Температура повторной критичности. Запас реактивности. Система компенсации запаса реактивности.	2	1-4
<b>Выгорание и воспроизводство ядерного топлива.</b> Изменение изотопного состава топливной загрузки активной зоны в процессе работы ядерного реактора. Кампания топлива. Кампания реактора. Выгорание топлива. Система дифференциальных уравнений выгорания топлива и ее решение. Необходимость роста нейтронного потока в активной зоне в течение кампании ядерного реактора для обеспечения условия постоянства мощности при работе реактора. Глубина выгорания топлива как количественная характеристика. Воспроизводство ядерного топлива. Первичное и вторичное ядерное топливо. Коэффициент воспроизводства (КВ) и его изменение в ходе кампании. Оценка максимально возможного КВ по балансу нейтронов. Значения КВ для различных типов ядерных реакторов. Энергетический и оружейный плутоний. Динамика выгорания первичного и накопления вторичного ядерного топлива. Проблемы длительного хранения вторичного ядерного топлива (ядерных материалов). Время удвоения топлива.	2	1-4
<b>Нейтронно-физические особенности водо-водяных энергетических реакторов. Нейтронно-физические особенности водо-графитовых энергетических реакторов.</b> Влияние водо-уранового соотношения на компоненты формулы четырех сомножителей и на безопасность установки. Выбор	2	1-4

<p>оптимального. Стратегии перегрузок топлива. Кампания топлива ВВЭР.</p> <p>Влияние уран-графитового соотношения на компоненты формулы четырех сомножителей и на безопасность установки. Выбор оптимального. Стратегии перегрузок топлива. Неравномерность энерговыделения в большой активной зоне. Усреднение параметров по полиячейкам. Создание выровненной зоны энерговыделения в центре реактора. Специфические эффекты реактивности у реактора РБМК.</p>		
<p><b>Нейтронно-физические особенности газографитовых энергетических реакторов. Нейтронно-физические особенности реакторов на быстрых нейтронах. Особенности работы на МОКС-топливе.</b> Концепции газоохлаждаемых реакторов (ВТГР) с шаровой засыпкой активной зоны и с призматическими топливными элементами. Движение шаров в активной зоне. Профиль энерговыделения. Стратегии пропускания шаровых твэлов через активную зону. Особенности гелия как теплоносителя. Микротвэльное топливо. Устройство реакторов с призматическими топливными элементами.</p> <p>История быстрой атомной энергетики, установки БН-350 и БН-600. Топливо для быстрых реакторов. Нейтронное поле и спектр нейтронов в быстром реакторе. Сложности при эксплуатации АЭС с реактором типа БН.</p> <p>Нейтронно-физические свойства изотопов плутония. Их влияние на нейтронно-физические свойства ячейки реактора. Влияние на эксплуатацию активной зоны, содержащей плутоний.</p>	2	1-4
<p><b>Шлакование и отравление ядерного реактора. Нестационарное отравление (переотравление) ядерного реактора ксеноном. Отравление ядерного реактора самарием-149.</b> Шлакование и отравления ядерного реактора. Группы шлаков. Решение дифференциального уравнения шлакования топлива. Шлакование как количественная характеристика. Отравление ксеноном-135. Отравление как количественная характеристика. Пути образования и убыли ксенона. Решение системы дифференциальных уравнений отравления реактора ксеноном. Отравление при пуске свежезагруженного ядерного реактора. Стационарное отравление ксеноном и его зависимость от величины нейтронного потока (мощности реактора). Зависимость величины предельного отравления ксеноном от обогащения топлива. Отравление ксеноном при останове ядерного реактора. Йодная яма и ее ядерная опасность. Оперативное время и время достижения максимального отравления ядерного реактора (дна йодной ямы). Необходимость компенсации высвобождаемой реактивности. Нестационарное отравление (переотравление) ксеноном в произвольных переходных режимах работы ядерного реактора. Положительная обратная связь по отравлению ксеноном при изменении мощности. Учет процессов отравления (переотравления) ксеноном в альбоме нейтронно-физических характеристик (АНФХ) топливной загрузки при работе блока. Аксиальные и диаметральные ксеноновые колебания. Аксиальный офсет. Процессы при изменении мощности. Дрейф</p>	4	1-4

<p>офсета. Основные причины возникновения аксиальных и диаметральных ксеноновых колебаний, их учет в альбоме нейтронно-физических характеристик (АНФХ) топливной загрузки при работе блока. Подавление ксеноновых колебаний. Рекомендации оперативному персоналу БЦУ (БПУ).</p> <p>Шлакование и отравления ядерного реактора. Самарий-149. Группы шлаков. Шлакование как количественная характеристика. Отравление самарием-149. Пути образования и убыли самария. Решение системы дифференциальных уравнений отравления реактора самарием. Отравление при пуске свежезагруженного ядерного реактора. Стационарное отравление самарием и его независимость от величины нейтронного потока (мощности реактора). Зависимость величины предельного отравления самарием от обогащения топлива. Отравление самарием при останове ядерного реактора. Прометиевый провал. «Самариевая смерть» реактора. Нестационарное отравление (переотравление) самарием в произвольных переходных режимах работы ядерного реактора. Учет величины стационарного отравления самарием в альбоме нейтронно-физических характеристик (АНФХ) топливной загрузки при работе блока. Сходство и различие в процессах отравления ксеноном и самарием. Совмещение процессов отравления ядерного реактора ксеноном и самарием на едином временном графике в произвольном режиме работы энергоблока.</p>		
---	--	--

### Перечень практических занятий

Тема практического занятия. Вопросы, обрабатываемые на практическом занятии	Всего часов	Учебно-методическое обеспечение
1	2	3
Вычисление нейтронно-физических характеристик для различных сред	4	5, 6
Расчет эффективного коэффициента размножения нейтронов для (бес)конечной гомогенной среды	4	5, 6
Условие критичности для гомогенного реактора конечных размеров без отражателя и с отражателем (задача Штурма Лиувилля)	4	5, 6
Определение критических размеров реактора без отражателя и с отражателем	4	5, 6
Энерговыделение в активной зоне. Остаточное энерговыделение	4	5, 6
Изменение изотопного состава активной зоны. Выгорание, воспроизводство ядерного топлива	4	5, 6
Изменение изотопного состава активной зоны. Стационарное отравление ксеноном, самарием	4	5, 6
Изменение изотопного состава активной зоны. Нестационарное отравление ксеноном, самарием	4	5, 6

## Задания для самостоятельной работы студентов

Вопросы для самостоятельного изучения (задания)	Всего часов	Учебно- методическое обеспечение
1	2	3
<p><b>1. Физическая классификация ядерных реакторов и нейтронный цикл</b></p> <p>Четыре условных поколения ядерных реакторов. Тенденции развития в реакторостроении. Новые проекты ядерных реакторов. Урановый и ториевый топливный цикл. Нейтронно-физические характеристики топливных и сырьевых нуклидов (U-233, U-235, U-238, Th-232, Pu-239, Pu-240, Pu-241, Pu-242). МОКС-топливо. Нейтронно-физические свойства поглотителей (B-10, Gd-157, Xe-135, Sm-149, Eu, Er). Требования, предъявляемые к замедлителям, и нейтронно-физические и другие свойства замедлителей (H<sub>2</sub>O, D<sub>2</sub>O, C, Be, BeO). Достоинства и недостатки применяемых замедлителей. Неупругое рассеяние на ядрах среды и его пороговый характер. Требования, предъявляемые к теплоносителям, и нейтроннофизические и другие свойства теплоносителей (H<sub>2</sub>O, D<sub>2</sub>O, Na, K, Li, Pb+Bi, CO<sub>2</sub>, Ar, He, N, воздух). Достоинства и недостатки применяемых теплоносителей.</p>	8	1-6
<p><b>2. Теория критических размеров и элементы теории решетки</b></p> <p>Гомо- и гетерогенный ядерный реактор. Коэффициенты формулы четырех сомножителей для гомо- и гетерогенного ядерного реактора. Критерии гомогенности (гетерогенности). Физические особенности гетерогенных ядерных реакторов. Влияние соотношения «замедлитель-топливо» (водо-уранового) соотношения на внешний и внутренний блок-эффекты и на эффективный коэффициент размножения нейтронов в ядерном реакторе. Количественные характеристики блокэффектов. Общая методика решения диф. уравнения диффузии для активной зоны ядерного реактора. Решение волнового уравнения (задача Штурма-Лиувилля). Материальный и геометрический параметры и их величины, их соотношение в реакторе. Условие критичности для гомогенного голого ядерного реактора конечных размеров. Критические размеры гомогенных голых реакторов различной геометрии, их геометрические параметры, распределение плотности потока нейтронов (пластина, сфера, параллелепипед, цилиндр). Минимальный критобъем гомогенного голого реактора различной геометрии. Коэффициенты неравномерности нейтронного потока (поля энерговыделения) для гомогенного голого реактора конечных размеров различной геометрии (пластина, сфера, параллелепипед, цилиндр). Гомогенный реактор с отражателем. Метод многих групп. Многогрупповое уравнение для плотности потока нейтронов и методика решения. Подготовка групповых констант. Функция ценности нейтронов. Метод одной и многих групп. Многогрупповое уравнение для ценности, смысл его слагаемых</p>	12	1-6

и методика решения. Выбор числа групп. Особенности подготовки многогрупповых констант. Свертка многогрупповых констант для малогрупповых приближений. Основные понятия метода ВПС. Применение метода вероятности первых столкновений (ВПС) для расчета различных решеток. Расчет эффективного резонансного интеграла методом ВПС. Условие эквивалентности резонансного поглощения в гетерогенной и гомогенной средах.		
<b>3. Нейтроннофизические процессы в ядерных реакторах</b> Метод Амуаля, Бенуа, Горовица (метод АБГ). Расчет длины диффузии и возраста нейтронов в решетке. Влияние параметров решетки на коэффициент размножения. Обратные связи в ядерном реакторе. Изменение изотопного состава топливной загрузки активной зоны в процессе работы ядерного реактора. Шлакование и отравления ядерного реактора. Нейтронно-физические особенности водо-водяных энергетических реакторов (ВВЭР, PWR), кипящих реакторов (РБМК, ВК, BWR), канальных реакторов (РБМК), высокотемпературных газо-графитовых реакторов (ВТГР), реакторов на быстрых нейтронах (с натриевым и свинцово-висмутовым теплоносителем). МОКС-топливо. Особенности эксплуатации ЯЭР на МОКС-топливе. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций (ОПБ). Авария и ядерная авария. Международная шкала ядерных событий (INES). Ядерные аварии на промышленных предприятиях и на АЭС в мире.	24	1-6

### Образовательные технологии

При реализации учебного материала курса используются различные образовательные технологии, способствующие созданию атмосферы свободной и творческой дискуссии как между преподавателем и студентами, так и в студенческой группе. Целью при этом является выработка у студентов навыков и компетенций, позволяющих самостоятельно вести исследовательскую и научно-педагогическую работу.

При изучении дисциплины «Физика ядерных реакторов» применяются следующие образовательные технологии:

- классическое лекционное обучение с использованием наглядных пособий;
- проведение лекций при поддержке мультимедиа;
- проведение практических занятий с решением примеров у доски, а также при поддержке мультимедиа, самостоятельное решение задач обучающимися в присутствии преподавателя;
- проблемный подход;
- разноуровневое обучение;
- самостоятельное изучение дисциплины обучающимися при помощи учебных печатных и электронных изданий;
- информационно-коммуникационные технологии – в институте имеются специализированные помещения для самостоятельной работы, оборудованные персональными компьютерами с выходом в Интернет и с доступом к электронно-библиотечной системе;
- интерактивный глоссарий по теоретической механике;
- методические указания (в том числе в электронной форме) по различным разделам дисциплины.

Самостоятельная работа студентов проводится под руководством преподавателей, с оказанием консультаций и помощи при подготовке к контрольным работам, выполнении

домашних заданий

### Фонд оценочных средств

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

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

№ п/п	Наименование контролируемых разделов (темы)	Код и наименование индикатора достижения компетенций	Наименование оценочного средства
Входной контроль			
1	Входной контроль		Вопросы входного контроля (устно)
Аттестация разделов, текущий контроль успеваемости			
1	Физическая классификация ядерных реакторов и нейтронный цикл	З-ОПК-1, У-ОПК-1, В-ОПК-1, З-ПК-9, У-ПК-9, В-ПК-9	Практические занятия Опрос в форме теста.
2	Теория критических размеров и элементы теории решетки	З-ОПК-1, У-ОПК-1, В-ОПК-1, З-ПК-9, У-ПК-9, В-ПК-9	Практические занятия Опрос в форме теста.
3	Нейтроннофизические процессы в ядерных реакторах	З-ОПК-1, У-ОПК-1, В-ОПК-1, З-ПК-9, У-ПК-9, В-ПК-9	Практические занятия Опрос в форме теста.
Промежуточная аттестация			
1	Экзамен	З-ОПК-1, У-ОПК-1, В-ОПК-1, З-ПК-9, У-ПК-9, В-ПК-9	Вопросы к экзамену (устно)

**Входной контроль** предназначен для выявления пробелов в знаниях студентов и готовности их к получению новых знаний. Оценочные средства для входного контроля представляют собой вопросы, которые задаются студентам в устной форме.

### Вопросы к собеседованию

1. Энергия связи ядра.
2. Ядерные реакции под действием гамма-квантов.
3. Ядерное взаимодействие частиц при низких энергиях. Образование промежуточного ядра
4. Оболочечная модель ядра. Правила заполнения оболочек.
5. Энергия связи ядер.
6. Законы сохранения и различные типы взаимодействий.
7. Особенности ядерных реакций под действием заряженных частиц.
8. Основные характеристики радиоактивного распада ядер. Законы радиоактивного распада. Энергетические условия возможности радиоактивного распада.
9.  $\alpha$ -Распад. Механизм  $\alpha$ -Распада (качественное рассмотрение).
10. Сечение ядерных реакций при низких энергиях (дисперсионная формула).
11.  $\beta$ -Распад. Различные виды  $\beta$ -Распада. Качественное рассмотрение механизма  $\beta$ -Распада.
12. Виды нейтронных реакций. Резонансные реакции. Источники нейтронов и их принцип действия.

13. Цепная реакция деления. Распределение энергии при распаде топливного ядра. Механизм образования тепла в ядерном реакторе (ЯР).
14. Спектры энергии нейтронов в тепловом ЯР. Понятие «термализация нейтронов». Отличия обычного и нейтронного газов. Вычисление по известной функции распределения нейтронов по энергиям средней, наиболее вероятной и медианной энергий спектра.
15. Характеристики нейтронного поля: спектр нейтронов, плотность нейтронов, плотность потока нейтронов, плотность тока нейтронов. Флюенс.
16. Скорость реакции данного вида для моноэнергетических нейтронов. Макроскопическое сечение.
17. Длина свободного пробега нейтронов. Физический смысл этих величин. Слабо- и сильнопоглощающая нейтроны среда.
18. Диффузия нейтронов. Закон Фика для нейтронов. Диффузионное приближение, условия его применимости. Выражения для односторонних токов нейтронов.
19. Транспортная длина рассеяния, транспортная длина и макросечение. Использование транспортных величин в уравнении диффузии
20. Утечка, поглощение и генерация нейтронов. Баланс нейтронов.
21. Уравнение диффузии для неделяющейся (слабоделяющейся) и размножающей среды. Длина диффузии. Материальный параметр реактора.
22. Интегральное уравнение для потока моноэнергетических нейтронов Пайерлса и кинетическое уравнение Больцмана (ознакомительно).
23. Граничные и прочие условия для нахождения решения уравнения диффузии для элементарных геометрий. Экстраполированная граница и экстраполированная длина. Методика решения уравнения диффузии.
24. Одногрупповое (односкоростное) диффузионное приближение. Понятие о многогрупповом приближении.
25. Кинематика столкновений. Центр масс (инерции) и определение его положения. Рассеяние (замедление) нейтронов на ядрах среды в ЛСК и СЦИ. Изо- и анизотропное рассеяние. Транспортные величины.
26. Зависимость потери энергии от угла рассеяния и массового числа. Минимальная и максимальная потеря энергии. Ступенька замедления. Функция распределения рассеянного нейтрона по энергии (летаргии) в пределах ступеньки замедления.
27. Среднелогарифмическая потеря энергии в одном столкновении. Летаргия. Замедляющая и поглощающая способность среды. Коэффициент замедления среды. Достоинства и недостатки применяемых замедлителей.
28. Уравнение замедления нейтронов в бесконечной среде. Энергетическое распределение замедляющихся нейтронов в бесконечной однородной непоглощающей среде для легких ядер (водорода), тяжелых ядер и смеси ядер. Спектр Ферми.
29. Замедление на легких ядрах (водороде,  $A=1$ ) с поглощением. Вероятность избежать поглощения при замедлении нейтронов. Замедление на тяжелых ядрах ( $A>1$ ) с поглощением.

#### **Шкала оценивания обучающегося на входном контроле**

<b>Требования к знаниям, умениям и навыкам обучающегося</b>	<b>Баллы рейтинговой оценки</b>
Обучающийся отлично владеет основными понятиями математики, физики, начертательной геометрии и инженерной графики, знает и умеет применять основные формулы и законы, может решать нестандартные задачи.	5

Обучающийся хорошо владеет большей частью основных понятий математики, физики, начертательной геометрии и инженерной графики, знает и умеет применять основные формулы и законы, владеет методикой решения типовых задач.	2-4
Обучающийся имеет удовлетворительный уровень знания математики, физики, начертательной геометрии и инженерной графики, знает основные формулы и законы, способен решать простейшие задачи.	1
Обучающийся практически не овладел значительной частью программного материала и не владеет важнейшими инструментами математики, физики и начертательной геометрии и инженерной графики, не умеет решать даже типовых задач.	0

## Оценочные средства для текущего контроля

### Раздел 1

#### Вопросы для устного опроса по разделу

##### «Физическая классификация реакторов и нейтронный цикл».

1. Спектры нейтронов, средняя, наиболее вероятная и медианная энергии спектра
2. Плотность нейтронов, плотность потока нейтронов, плотность тока нейтронов (ток нейтронов), флюенс,
3. Скорость реакции данного вида, плотность реакции данного вида (плотность замедления, деления и т.п.) нейтронов, микро- и макроскопическое сечения
4. Формула Брейта-Вигнера, закон  $1/v$  для микросечений и его классическое толкование
5. Длина свободного пробега нейтронов, длина диффузии
6. Возраст нейтронов, длина миграции, площадь миграции
7. Летаргия, закономерности процесса замедления нейтронов, ступенька замедления, ступенчатое и непрерывное замедление нейтронов.
8. Ядерная энергетика. Сырьевые (воспроизводящее, пороговыми, делимые) нуклиды. Топливные или делящиеся нуклиды.
9. Механизм образования тепла в ядерном реакторе. Принципы работы и возможные составляющие активной зоны ядерного реактора (ЯР).
10. Классификация ЯР по различным параметрам, классификация ЯР МАГАТЭ.
11. Одно-, двух- и трехконтурные АЭС и их особенности.
12. Четыре условных поколения ядерных реакторов. Тенденции развития в реакторостроении.
13. Новые проекты ядерных реакторов.
14. Урановый и ториевый топливный цикл.
15. Нейтронно-физические характеристики топливных и сырьевых нуклидов (U-233, U-235, U-238, Th-232, Pu-239, Pu-240, Pu-241, Pu-242). МОКС-топливо.
16. Нейтронно-физические свойства поглотителей (B-10, Gd-157, Xe-135, Sm-149, Eu, Er).
17. Требования, предъявляемые к замедлителям, и нейтронно-физические и другие свойства замедлителей (H<sub>2</sub>O, D<sub>2</sub>O, C, Be, BeO).
18. Требования, предъявляемые к теплоносителям, и нейтронно-физические и другие свойства теплоносителей (H<sub>2</sub>O, D<sub>2</sub>O, Na, K, Li, Pb+Bi, CO<sub>2</sub>, Ar, He, N, воздух). Достоинства и недостатки применяемых теплоносителей.
19. Нейтронный цикл в тепловом ядерном реакторе.
20. Физический смысл и значение (для ВВЭР-1000) множителей формулы 4-х сомножителей
21. Утечка нейтронов. Вероятность избежать утечки при замедлении. Вероятность избежать утечки при диффузии.



22. Баланс нейтронов. Эффективный коэффициент размножения нейтронов для бесконечной и конечной сред.
23. Реактивность. Единицы измерения реактивности.
24. Влияние изменения линейных размеров гомогенного ядерного реактора на кэф. и реактивность (качественное объяснение)

### **Шкала оценивания обучающегося на опросе**

На опрос предлагаются четыре вопроса на усмотрение преподавателя: из группы 1-9, 1014, 15-18, 19-24. Время ответа на вопрос 1-1,5 минуты. Критерии оценки (максимальное количество баллов – 20 баллов): Стоимость ответа на каждый вопрос составляет 5 баллов. 20 баллов – при ответе на 4 вопроса; 15 баллов – при ответе на 3 вопроса; 10 баллов – при ответе на 2 вопроса; 5 баллов – при ответе на 1 вопрос; 0 баллов – при отсутствии ответа на все вопросы. Неполные и частично ошибочные ответы на вопрос могут быть оценены в 3 балла.

## **Раздел 2**

### **Вопросы для устного опроса по разделу**

#### **«Теория критических размеров и элементы теории решетки».**

1. Коэффициент использования тепловых нейтронов для гомо- и гетерогенного ЯР..
2. Вероятность избежать резонансного захвата на уране-238 для гомо- и гетерогенного ЯР.
3. Физические особенности гетерогенных ядерных реакторов. Влияние соотношения «замедлитель-топливо» (вода-уранового) соотношения на эффективный коэффициент размножения нейтронов в ядерном реакторе.
4. Общая методика решения диф. уравнения диффузии для активной зоны ядерного реактора.
5. Условие критичности для гомогенного голого ядерного реактора конечных размеров.
6. распределение плотности потока нейтронов (пластина, сфера, параллелепипед, цилиндр).
7. Коэффициенты неравномерности нейтронного потока (поля энерговыделения) для гомогенного голого реактора конечных размеров различной геометрии.
8. Утечка нейтронов. Функции отражателя.
9. Гомогенный реактор с отражателем в однокрупном приближении. Граничные и краевые условия.
10. Эффективная добавка отражателя.
11. Понятие «большого» или «малого» ЯР с точки зрения размеров и величины утечки нейтронов из активной зоны ядерного реактора.
12. Метод многих групп. Выбор числа групп.

### **Шкала оценивания обучающегося на опросе**

На опрос предлагаются четыре вопроса на усмотрение преподавателя. Время ответа на вопрос 1-1,5 минуты. Критерии оценки (максимальное количество баллов – 20 баллов): Стоимость ответа на каждый вопрос составляет 5 баллов. 20 баллов – при ответе на 4 вопроса; 15 баллов – при ответе на 3 вопроса; 10 баллов – при ответе на 2 вопроса; 5 баллов – при ответе на 1 вопрос; 0 баллов – при отсутствии ответа на все вопросы. Неполные и частично ошибочные ответы на вопрос могут быть оценены в 3 балла.

## **Раздел 3**

### **Вопросы для устного опроса по разделу**

#### **«Нейтронно-физические процессы в ядерных реакторах».**

1. Влияние изменения температуры на коэффициенты формулы 4-х сомножителей и на утечку нейтронов из реактора.
2. Обратные связи в ядерном реакторе

3. Ядерный и плотностной ТЭР.
4. Мощностной эффект и коэффициент реактивности (МЭР и МКР)
5. Барометрический и паровой эффекты и коэффициенты реактивности.
6. Саморегулирование ядерных реакторов. Требования ядерной безопасности к знаку и величинам (соотношению) ТЭР и МЭР, ТКР и МКР.
7. Эффекты реактивности в процессе снижения мощности и расхолаживания ядерного реактора.
8. Запас реактивности. Система компенсации запаса реактивности.
9. Изменение изотопного состава топливной загрузки активной зоны в процессе работы ядерного реактора.
10. Кампания топлива. Кампания реактора. Выгорание топлива.
11. Глубина выгорания топлива как количественная характеристика.
12. Воспроизводство ядерного топлива. Первичное и вторичное ядерное топливо.
13. Коэффициент воспроизводства (КВ) и его изменение в ходе кампании.

### **Шкала оценивания обучающегося на опросе**

На опрос предлагаются четыре вопроса на усмотрение преподавателя. Время ответа на вопрос 1-1,5 минуты. Критерии оценки (максимальное количество баллов – 20 баллов): Стоимость ответа на каждый вопрос составляет 5 баллов. 20 баллов – при ответе на 4 вопроса; 15 баллов – при ответе на 3 вопроса; 10 баллов – при ответе на 2 вопроса; 5 баллов – при ответе на 1 вопрос; 0 баллов – при отсутствии ответа на все вопросы. Неполные и частично ошибочные ответы на вопрос могут быть оценены в 3 балла.

### **Оценочные средства для промежуточной аттестации**

#### **Вопросы к экзамену**

1. Понятия: спектр нейтронов, плотность нейтронов, плотность потока нейтронов, плотность тока нейтронов (ток нейтронов). Флюенс. Скорость реакции данного вида. Плотность реакции данного вида (плотность замедления, деления и т.п.) нейтронов. Микро- и макроскопическое сечения. Закон  $1/v$  для микросечений и его классическое толкование. Длина свободного пробега нейтронов. Возраст нейтронов, длина диффузии и длина миграции. Площадь миграции. Летагия. Слабо- и сильнопоглощающая нейтроны среда.

2. Ядерная энергетика: современное состояние и тенденции развития. Проблемы ядерной энергетики. Сырьевые (воспроизводящее, пороговыми, делимые) нуклиды. Топливные или делящиеся нуклиды. Возможные составляющие активной зоны ядерного реактора (ЯР). Классификация ЯР по различным параметрам, классификация ЯР МАГАТЭ. Одно-, двух- и трехконтурные АЭС.

3. Четыре поколения ядерных реакторов. Тенденции развития в реакторостроении. Новые проекты ядерных реакторов.

4. Урановый и ториевый топливный цикл. Нейтронно-физические характеристики топливных и сырьевых нуклидов (2-4 нуклида по выбору преподавателя: U-233, U-235, U-238, Th-232, Pu-239, Pu-240, Pu-241, Pu-242).

5. Нейтронно-физические свойства поглотителей (2-3 нуклида по выбору преподавателя: B-10, Gd-157, Xe-135, Sm-149, Eu, Er).

6. Требования, предъявляемые к замедлителям, и нейтронно-физические и другие свойства замедлителей (H<sub>2</sub>O, D<sub>2</sub>O, C, Be, BeO). Достоинства и недостатки применяемых замедлителей. Неупругое рассеяние на ядрах среды и его пороговый характер.

7. Требования, предъявляемые к теплоносителям, и нейтронно-физические и другие свойства теплоносителей (2-3 теплоносителя по выбору преподавателя: H<sub>2</sub>O, D<sub>2</sub>O, Na, K, Li, Pb+Bi, CO<sub>2</sub>, Ar, He, N, воздух). Достоинства и недостатки применяемых теплоносителей.

8. Нейтронный цикл в тепловом ядерном реакторе. Время замедления и время диффузии нейтронов. Время жизни поколения. Физический смысл и значение (для ВВЭР-1000) множителей формулы 4-х сомножителей. Утечка нейтронов. Вероятность избежать утечки при замедлении. Вероятность избежать утечки при диффузии. Баланс нейтронов. Эффективный коэффициент размножения нейтронов для бесконечной и конечной сред. Реактивность. Единицы измерения реактивности. Влияние изменения линейных размеров гомогенного ядерного реактора на Кэф. и реактивность (качественное объяснение).

9. Коэффициенты формулы четырех сомножителей для гомо- и гетерогенного ядерного реактора. Расчет гомогенизированных ядерных концентраций в ячейке (гомогенизация ячейки). Критерий гомогенности (гетерогенности). Фактор проигрыша.

10. Коэффициент использования тепловых нейтронов для гомо- и гетерогенного ЯР. Фактор проигрыша. Вероятность избежать резонансного захвата на уране-238 для гомо- и гетерогенного ЯР. Эффективный и истинный резонансный интеграл поглощения. Фактор самоэкранирования. Зависимости  $\phi$  и  $\theta$  от диаметра топливной таблетки (типа реактора – гомо-гетеро).

11. Физические особенности гетерогенных ядерных реакторов. Влияние соотношения «замедлитель-топливо» (вода-уранового) соотношения на внешний и внутренний блок-эффекты и на эффективный коэффициент размножения нейтронов в ядерном реакторе. Количественные характеристики блок-эффектов.

12. Общая методика решения диф. уравнения диффузии для активной зоны ядерного реактора. Условие критичности для гомогенного голого ядерного реактора конечных размеров. Материальный и геометрический параметры и их величины, их соотношение в реакторе.

13. Критические размеры гомогенных голых реакторов различной геометрии, их геометрические параметры, распределение плотности потока нейтронов (пластина, сфера, параллелепипед, цилиндр).

14. Критическая масса и критический объем. Минимальный критический объем гомогенного голого реактора различной геометрии. Коэффициенты неравномерности нейтронного потока для гомогенного голого реактора конечных размеров различной геометрии (пластина, сфера, параллелепипед, цилиндр).

15. Функции отражателя. Эквивалентный реактор. Эффективная добавка отражателя. Тонкий и толстый отражатель, бесконечно толстый отражатель.

16. Гомогенный реактор с отражателем в однокрупном приближении. Методика получения условия критичности.

17. Гомогенный реактор с отражателем в двухкрупном приближении. Методика получения условия критичности. Распределение тепловых нейтронов в отражателе.

18. Понятие «большого» или «малого» ЯР с точки зрения размеров и величины утечки нейтронов из активной зоны ядерного реактора (качественное объяснение).

19. Коэффициенты неравномерности поля энерговыделения в ядерном реакторе и способы их уменьшения. Физическое профилирование.

20. Метод многих групп. Выбор числа групп. Подготовка групповых констант. Многогрупповое уравнение для плотности потока нейтронов, смысл его слагаемых и методика решения. Нормировка констант на удельную тепловую мощность реактора.

21. Метод многих групп. Функция ценности нейтронов. Многогрупповое уравнение для ценности, смысл его слагаемых и методика решения.

22. Метод многих групп. Выбор числа групп. Особенности подготовки многогрупповых констант. Свертка многогрупповых констант для малогрупповых приближений.

23. Методика получения критического уравнения реактора.

24. Гомо- и гетерогенные реакторы и их нейтронно-физические особенности. Критерий гомогенности (гетерогенности). Эффекты гетерогенности. Классификация решеток. Основные

понятия метода ВПС. Соотношения между вероятностями. Простые и сложные вероятности. Основные приближения и допущения. Элементарная ячейка Вигнера-Зейца. Условия зеркального и диффузионного отражения на границах ячейки. Приближение Белла. Коэффициенты "затенения" решетки. Формула Зауэра.

25. Температурные эффекты в реакторе. Зависимость от температуры параметров в формуле 4-х сомножителей.

26. Выгорание и воспроизводство ядерного топлива. Глубина выгорания. Изменение изотопного состава топлива в активной зоне реактора при его работе. Уравнение выгорания и воспроизводства ядерного топлива (уравнения изотопной кинетики). Отравление и шлакование, группы шлаков. Перегрузки топлива. Кампания топлива. Кампания реактора. Урановый и ториевый топливный цикл.

27. Реактивность. Эффекты реактивности. ТЭР и ТКР по замедлителю и топливу, порядки их величин. Виды кривых ТЭР реакторов, их достоинства и недостатки. Запас реактивности. Система компенсации запаса реактивности в реакторах различных типов. Требования ядерной безопасности. Температура повторной критичности.

28. Эффект Доплера. Мощностной и температурный эффекты реактивности, их проявление и величины. Барометрический и паровой эффект реактивности, их проявление и величины. Обратные связи и саморегулирование ядерных реакторов. Требования ядерной безопасности.

29. Отравление ядерного реактора ксеноном-135. Процессы образования и убыли ксенона. Полная система диф. уравнений отравления ксеноном для моноэнергетических нейтронов и ее решения. Связь отравления с реактивностью. Стационарное и нестационарное отравление ксеноном. Зависимость стационарного отравления ксеноном от величины плотности потока нейтронов, мощности и обогащения топлива. Эффективный период полураспада ксенона и прометия. Факторы, определяющие глубину йодной ямы. Оперативное время и время вынужденной стоянки. Ксеноновые колебания.

30. Шлакование ядерного реактора. Группы шлаков. Отравление самарием-149. Процессы образования и убыли самария. Полная система диф. уравнений отравления самарием для моноэнергетических нейтронов и ее решения. Связь отравления с реактивностью. Стационарное и нестационарное отравление самарием. Зависимость стационарного отравления самарием от величины плотности потока нейтронов, мощности и энерговыработки реактора и обогащения топлива. Прометиевый провал. «Самариевая смерть» реактора.

31. Сходства и отличия в отравлении реактора ксеноном и самарием. Сопоставление процессов отравления ядерного реактора ксеноном и самарием в случае произвольного режима работы (произвольного изменения мощности реактора по заданию преподавателя).

32. Нейтронно-физические особенности водо-водяных энергетических реакторов (с водой под давлением – ВВЭР).

33. Нейтронно-физические особенности кипящих корпусных водо-водяных реакторов (ВК, PWR).

34. Нейтронно-физические особенности кипящих канальных водо-графитовых реакторов (РБМК).

35. Нейтронно-физические особенности тяжеловодных реакторов (CANDU).

36. Нейтронно-физические особенности высокотемпературных газографитовых реакторов (ВТГР).

37. Нейтронно-физические особенности реакторов на быстрых нейтронах (БН).

38. MOX-топливо. Особенности эксплуатации ЯЭР на MOX-топливе.

### Шкала оценивания обучающегося на экзамене

Уровень освоения материала	Оценка (стандартная)	Баллы рейтинговой оценки
Теоретическое содержание дисциплины освоено полностью, без пробелов, необходимые практические навыки работы с материалом полностью сформированы. Обучающийся исчерпывающе, последовательно, четко и логически стройно излагает материал, умеет тесно увязывать теорию с практикой, владеет разносторонними навыками и приемами выполнения практических задач, причем не затрудняется с ответом при видоизменении заданий.	Отлично	36-40
Теоретическое содержание дисциплины освоено практически полностью, обучающийся грамотно и по существу излагает материал, не допуская существенных неточностей, правильно применяет теоретические положения при решении практических вопросов и задач, владеет необходимыми навыками и приемами их выполнения.	Хорошо	31-35
Теоретическое содержание дисциплины освоено частично, обучающийся имеет знания только основного материала, допускает неточности, недостаточно правильные формулировки, нарушения логической последовательности в изложении материала, но пробелы не носят существенного характера, необходимые практические навыки работы с освоенным материалом в основном сформированы, однако обучающийся испытывает затруднения при решении практических задач.	Удовлетворительно	24-30
Теоретическое содержание дисциплины освоено частично, обучающийся допускает существенные ошибки, не видит взаимосвязи теории с практикой, необходимые практические навыки работы не сформированы, большинство предусмотренных рабочей программой дисциплины учебных заданий не выполнено. Необходима дополнительная самостоятельная работа над материалом курса.	Не удовлетворительно	0-23

Баллы итоговой рейтинговой оценки по дисциплине «Физика ядерных реакторов»:

Баллы (итоговой рейтинговой оценки)	Освоение компетенций	Требования к знаниям
100-85	Продвинутый уровень	Ответы на поставленные вопросы полные, четкие и развернутые. Решения задач логичны, доказательны и демонстрируют аналитические и творческие способности студента.
84-70	Средний уровень	Даются полные ответы на поставленные вопросы. Показано умение выделять причинно-следственные связи. При решении задач допущены незначительные ошибки, исправленные с помощью «наводящих» вопросов

		преподавателя.
69-60	Базовый уровень	Ответы на вопросы и решения поставленных задач недостаточно полные. Логика и последовательность в решении задач имеют нарушения. В ответах отсутствуют выводы.

Студент, получивший менее 60% от максимального балла за раздел дисциплины или промежуточную аттестацию, считается неаттестованным по данной дисциплине.

### **Учебно-методическое и информационное обеспечение учебной дисциплины**

#### **Основная литература**

1. Савандер, В. И. Физическая теория ядерных реакторов : учебное пособие / В. И. Савандер, М. А. Увакин. — Москва : НИЯУ МИФИ, [б. г.]. — Часть 2 : Теория возмущений и медленные нестационарные процессы — 2013. — 152 с.  
<https://e.lanbook.com/reader/book/75779/#4>

2. Лескин, С. Т. Физические особенности и конструкция реактора ВВЭР-1000 : учебное пособие / С. Т. Лескин, А. С. Шелегов, В. И. Слободчук. — Москва : НИЯУ МИФИ, 2011. — 116 с. <https://e.lanbook.com/reader/book/75760/#2>

3. Широков С.В. Физика ядерных реакторов / С.В. Широков. - Минск : Вышэйшая школа, 2011. - 349 с. <https://ibooks.ru/bookshelf/27658/reading>

#### **Дополнительная литература**

4. Казанский, Ю. А. Кинетика ядерных реакторов. Коэффициенты реактивности. Введение в динамику : учебное пособие / Ю. А. Казанский, Я. В. Слекеничс. — Москва : НИЯУ МИФИ, 2012. — 300 с. <https://e.lanbook.com/reader/book/75770/#2>

5. Моделирование физических процессов в ядерных реакторах: лабораторный практикум : учебное пособие / А. Г. Наймушин, Ю. Б. Чертков, М. Н. Аникин, И. И. Лебедев. — Томск : ТПУ, 2015. — 111 с. <https://e.lanbook.com/reader/book/82839/#3>

6. Увакин, М. А. Лабораторный практикум "Физическая теория ядерных реакторов : учебное пособие / М. А. Увакин, В. И. Савандер. — Москва : НИЯУ МИФИ, 2013. — 56 с. <https://e.lanbook.com/reader/book/75781/#1>

### **Материально-техническое обеспечение учебной дисциплины**

Лекционные и практические занятия проводятся в учебной аудитории, оборудованной видеопроектором, экраном, персональным компьютером и динамиками.

Для самостоятельной работы обучающихся имеются специализированные помещения, оборудованные персональными компьютерами с выходом в Интернет и с доступом к электронно-библиотечной системе, электронной библиотеке и электронной информационно-образовательной среде вуза, а также к другим библиотечным фондам.

### **Учебно-методические рекомендации для студентов**

#### **1. Указания для прослушивания лекций**

Перед началом занятий внимательно ознакомиться с учебным планом проведения лекций и списком рекомендованной литературы.

Перед посещением очередной лекции освежить в памяти основные концепции пройденного ранее материала. Подготовить при необходимости вопросы преподавателю. Не надо опасаться, что вопросы могут быть простыми.

На лекции основное внимание следует уделять не формулам и математическим

выкладкам, а содержанию изучаемых вопросов, определениям и постановкам задач.

В процессе изучения лекционного курса необходимо по возможности часто возвращаться к основным понятиям и методам решения задач (здесь возможен выборочный контроль знаний студентов).

Желательно использовать конспекты лекций, в которых используется принятая преподавателем система обозначений.

Для более подробного изучения курса следует работать с рекомендованными литературными источниками и вновь появляющимися источниками.

## 2. Указания для участия в практических занятиях

Перед посещением практического занятия уяснить тему и самостоятельно изучить связанные с ней понятия и методы решения задач.

Перед решением задач активно участвовать в обсуждении с преподавателем основных понятий, связанных с темой практического занятия.

В процессе решения задач вести дискуссию с преподавателем о правильности применения методов их решения.

По возможности самостоятельно доводить решение предлагаемых задач до окончательного итога.

В конце практического занятия при необходимости выяснить у преподавателя неясные вопросы.

Основные результаты выполнения работы необходимо распечатать.

## 3. Указания для выполнения самостоятельной работы

Получить у преподавателя задание и список рекомендованной литературы. Изучение теоретических вопросов следует проводить по возможности самостоятельно, но при затруднениях обращаться к преподавателю.

Подготовить письменный отчет о проделанной работе.

При выполнении фронтальных заданий по усмотрению преподавателя работа может быть оценена без письменного отчета на основе ответов на контрольные вопросы, при условии активной самостоятельной работы.

Подготовить ответы на контрольные вопросы.

## **Методические рекомендации для преподавателей**

### 1. Указания для проведения лекций

На первой вводной лекции сделать общий обзор содержания курса и отметить новые методы и подходы к решению задач, рассматриваемых в курсе, довести до студентов требования кафедры, ответить на вопросы.

При подготовке к лекционным занятиям необходимо продумать план его проведения, содержание вступительной, основной и заключительной части лекции, ознакомиться с новинками учебной и методической литературы, публикациями периодической печати по теме лекционного занятия. Уточнить план проведения практического занятия по теме лекции. Перед изложением текущего лекционного материала напомнить об основных итогах, достигнутых на предыдущих лекциях. С этой целью задать несколько вопросов аудитории и осуществить выборочный контроль знания студентов.

В ходе лекционного занятия преподаватель должен назвать тему, учебные вопросы, ознакомить студентов с перечнем основной и дополнительной литературы по теме занятия. Раскрывая содержание учебных вопросов, акцентировать внимание студентов на основных категориях, явлениях и процессах, особенностях их протекания. Раскрывать сущность и содержание различных точек зрения и научных подходов к объяснению тех или иных явлений и

процессов.

Следует аргументировано обосновать собственную позицию по спорным теоретическим вопросам. Приводить примеры. Задавать по ходу изложения лекционного материала риторические вопросы и самому давать на них ответ. Это способствует активизации мыслительной деятельности студентов, повышению их внимания и интереса к материалу лекции, ее содержанию. Преподаватель должен руководить работой студентов по конспектированию лекционного материала, подчеркивать необходимость отражения в конспектах основных положений изучаемой темы, особо выделяя, категориальный аппарат. В заключительной части лекции необходимо сформулировать общие выводы по теме, раскрывающие содержание всех вопросов, поставленных в лекции. Объявить план очередного практического занятия, дать краткие рекомендации по подготовке студентов к практическому занятию. Определить место и время консультации студентам, пожелавшим выступить с докладами и рефератами.

На последней лекции уделить время для обзора наиболее важных положений, рассмотренных в курсе.

## 2. Указания для проведения практических занятий

Четко обозначить тему практического занятия

Обсудить основные понятия, связанные с темой практического занятия.

В процессе решения задач вести дискуссию со студентами о правильности применения теоретических знаний.

Отмечать студентов, наиболее активно участвующих в решении задач и дискуссиях.

В конце практического занятия задать аудитории несколько контрольных вопросов.

## 3. Указания по контролю самостоятельной работы студентов

По усмотрению преподавателя задание на самостоятельную работу может быть индивидуальным или фронтальным.

При использовании индивидуальных заданий требовать от студента письменный отчет о проделанной работе.

При применении фронтальных заданий вести коллективные обсуждения со студентами основных теоретических положений.

С целью контроля качества выполнения самостоятельной работы требовать индивидуальные отчеты (допустимо вместо письменного отчета применять индивидуальные контрольные вопросы).

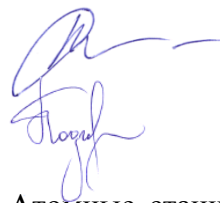
Программа составлена в соответствии с требованиями ОС НИЯУ МИФИ и учебным планом основной образовательной программы по специальности 14.05.02 Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг

Рабочую программу составил профессор

Рецензент: доцент

Программа одобрена на заседании УМКС 14.05.02 Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг от 04.07.2023 года, протокол №6.

Председатель учебно-методической комиссии



Чернова Н.М.

Подгорнов А.А.



Магерамов Р. А.