

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ
КАФЕДРА ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ ЯДЕРНЫХ
РЕАКТОРОВ

ОДОБРЕНО УМС ИЯФИТ

Протокол № 01/08/24-573.1

от 30.08.2024 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ
ФИЗИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

Направление подготовки
(специальность)

[1] 14.05.01 Ядерные реакторы и материалы

Семестр	Трудоемкость, кред.	Общий объем курса, час.	Лекции, час.	Практич. занятия, час.	Лаборат. работы, час.	В форме практической подготовки/ В	СРС, час.	КСР, час.	Форма(ы) контроля, экз./зач./КР/КП
10	4-6	144- 216	15	30	0		45-117	0	Э
Итого	4-6	144- 216	15	30	0	0	45-117	0	

АННОТАЦИЯ

В начале курса излагаются основы понятия ценности нейтронов и на этой методической основе приводится методика оценки реактивности реактора, используя теорию малых возмущений. В дальнейшем основное внимание уделяется медленным нестационарным процессам в реакторе, как то ксеноновые переходные процессы, изменение изотопного состава топлива в процессе выгорания и коэффициента размножения решетки твэлов. Рассматриваются различные схемы перегрузок топлива для повышения выгорания.

Излагается материал по воспроизводству топлива в реакторах на быстрых нейтронах, показана зависимость КВ от структуры активной зоны. Показана возможность расширенного воспроизводства топлива и работа двухкомпонентной системы реакторов без подпитки топливом из вне.

Последняя часть посвящена оценке эффективности органов регулирования в зависимости от положения в активной зоне и размеров и состава органов регулирования. Вводится понятие решетки регуляторов и интерференции регуляторов.

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Цель освоения учебной дисциплины состоит в том, чтобы дать студентам, специализирующимся по физике ядерных реакторов, углубленное представление об основных типах освоенных в мировой практике ядерных реакторов, показать неразрывную связь физических и конструктивных особенностей реакторов различных типов, их сравнительный анализ по эффективности топливоиспользования и наличию внутренне присущих свойств безопасности.

2. МЕСТО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВО

Задачи изучения дисциплины состоят в том, чтобы подготовить студентов к самостоятельному решению вопросов, связанных с проектированием ядерно-энергетических установок нового поколения с учетом богатого опыта ядерных реакторов существующих типов, обращая главное внимание на вопросы повышения эффективности использования топлива и безопасности ЯЭУ

Перечень дисциплин, усвоение которых необходимо для изучения данной дисциплины:

1. Физическая теория ядерных реакторов;
2. Динамика и безопасность ядерных реакторов;
3. Основы теплопередачи и теплопроводности;
4. Теория обыкновенных дифференциальных уравнений.

3. ФОРМИРУЕМЫЕ КОМПЕТЕНЦИИ И ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ

Универсальные и(или) общепрофессиональные компетенции:

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенции
--------------------------------	--

Профессиональные компетенции в соответствии с задачами и объектами (областями знаний) профессиональной деятельности:

Задача профессиональной деятельности (ЗПД)	Объект или область знания	Код и наименование профессиональной компетенции; Основание (профессиональный стандарт-ПС, анализ опыта)	Код и наименование индикатора достижения профессиональной компетенции
проектный			
Проектирование, создание и внедрение новых продуктов и систем, применение теоретических знаний в реальной инженерной практике	Атомный ледокольный флот Атомные электрические станции Плавучая АЭС Сфера научных исследований в области ядерной физики и технологий	ПК-2.6 [1] - способен проводить модернизацию существующих установок, разрабатывать и проектировать перспективные физико-энергетических установки <i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 40.011	3-ПК-2.6[1] - Знать: классификацию атомных электростанций, главные их составляющие, включая контуры охлаждения, парогенераторы, паровые турбины, компоновку основного контура теплоносителя и вспомогательные системы; компоненты ядерного топливного цикла, открытый и замкнутый топливный циклы; классификацию радиоактивных отходов, методы обращения и захоронения различных типов радиоактивных отходов, краткосрочные и долгосрочные последствия действия ионизирующего излучения ; У-ПК-2.6[1] - Уметь: проводить экономический анализ новых технологических процессов, систем или методик, которые могут найти применение на ЯЭУ; В-ПК-2.6[1] - Владеть: навыками конструирования и

			внедрения новых продукты или системы, предназначенные для ЯЭУ
--	--	--	---

4. ВОСПИТАТЕЛЬНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ДИСЦИПЛИНЫ

Направления/цели воспитания	Задачи воспитания (код)	Воспитательный потенциал дисциплин
Профессиональное воспитание	Создание условий, обеспечивающих, формирование ответственности за профессиональный выбор, профессиональное развитие и профессиональные решения (B18)	Использование воспитательного потенциала дисциплин профессионального модуля для формирования у студентов ответственности за свое профессиональное развитие посредством выбора студентами индивидуальных образовательных траекторий, организации системы общения между всеми участниками образовательного процесса, в том числе с использованием новых информационных технологий.
Профессиональное воспитание	Создание условий, обеспечивающих, формирование научного мировоззрения, культуры поиска нестандартных научно-технических/практических решений, критического отношения к исследованиям лженаучного толка (B19)	1.Использование воспитательного потенциала дисциплин/практик «Научно-исследовательская работа», «Проектная практика», «Научный семинар» для: - формирования понимания основных принципов и способов научного познания мира, развития исследовательских качеств студентов посредством их вовлечения в исследовательские проекты по областям научных исследований. 2.Использование воспитательного потенциала дисциплин "История науки и инженерии", "Критическое мышление и основы научной коммуникации", "Введение в специальность", "Научно-исследовательская работа", "Научный семинар" для: - формирования способности отделять настоящие научные исследования от лженаучных посредством проведения со студентами занятий и регулярных бесед; - формирования критического

		мышления, умения рассматривать различные исследования с экспертной позиции посредством обсуждения со студентами современных исследований, исторических предпосылок появления тех или иных открытий и теорий.
--	--	--

5. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

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

№ п.п	Наименование раздела учебной дисциплины	Недели	Лекции/ Практ. (семинары) / Лабораторные работы, час.	Обязат. текущий контроль (форма*, неделя)	Максимальный балл за раздел**	Аттестация раздела (форма*, неделя)	Индикаторы освоения компетенции
	<i>10 Семестр</i>						
1	Часть 1	1-8	8/16/0		25	КИ-8	3-ПК-2.6, У-ПК-2.6, В-ПК-2.6
2	Часть 2	9-15	7/14/0		25	КИ-15	3-ПК-2.6, У-ПК-2.6, В-ПК-2.6
	<i>Итого за 10 Семестр</i>		15/30/0		50		
	Контрольные мероприятия за 10 Семестр				50	Э	3-ПК-2.6, У-ПК-2.6, В-ПК-2.6

* – сокращенное наименование формы контроля

** – сумма максимальных баллов должна быть равна 100 за семестр, включая зачет и (или) экзамен

Сокращение наименований форм текущего контроля и аттестации разделов:

Обозначение	Полное наименование
КИ	Контроль по итогам
Э	Экзамен

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Недели	Темы занятий / Содержание	Лек., час.	Пр./сем., час.	Лаб., час.
	<i>10 Семестр</i>	15	30	0

1-8	Часть 1	8	16	0
1	Введение в проблему. Введение в проблему. Цели и задачи курса. Современные проблемы ядерной энергетики. Классификация ядерных реакторов по спектру, по типу замедлителя и теплоносителя. Топливные циклы ядерных реакторов. Основные характеристики ядерных реакторов.	Всего аудиторных часов		
		1	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
2 - 3	Реакторы водо-водяного типа. Реакторы водо-водяного типа. Свойства воды как замедлителя и теплоносителя. Нейтронно-физические характеристики уран-водных решеток, их зависимость от водо-уранового отношения и температуры замедлителя. Оптимальный выбор параметров уран-водных решеток. Организация внутреннего топливного цикла в реакторах корпусного типа. Частичные перегрузки с перестановкой. Перегрузки от края к центру и от центра к краю. Оптимальный выбор обогащения топлива. Способы компенсации избыточной реактивности. Борное регулирование. Использование выгорающих поглотителей. Внутренне присущие свойства безопасности. Коэффициенты и эффекты реактивности. Плотностной и температурные коэффициенты реактивности. Влияние борного поглотителя на температурный коэффициент реактивности по замедлителю.	Всего аудиторных часов		
		2	4	0
		Онлайн		
		0	0	0
4 - 5	Уран-графитовые реакторы. Уран-графитовые реакторы. Свойства графита как замедлителя нейтронов. Водо-графитовые (РБМК) и газо-графитовые (ВТГР) реакторы. Водо-графитовые реакторы - реакторы канального типа. Преимущества и недостатки канальных реакторов. Организация непрерывных перегрузок топлива. Связь глубины выгорания и коэффициента неравномерности энерговыделения. Коэффициенты и эффекты реактивности в канальных реакторах. Паровой коэффициент реактивности и его зависимость от глубины выгорания топлива и параметров решетки. Неустойчивость полей энерговыделения в реакторах РБМК. Усовершенствованные реакторы канального типа (МКЭР-800). Высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы. Микротвэльная технология изготовления топлива. Призматическая и шаровая концепции ВТГР. Непрерывное аксиальное движение топлива. Ториевый топливный цикл в ВТГР. Коэффициенты и эффекты реактивности. Температурный коэффициент реактивности по топливу и замедлителю. Регулирование реактора с шаровой засыпкой. Глубокое выжигание оружейного плутония в ВТГР.	Всего аудиторных часов		
		2	4	0
		Онлайн		
		0	0	0
6 - 8	Тяжеловодные реакторы. Тяжеловодные реакторы. Нейтронно-физические характеристики дейтерия. Использование тяжелой воды в качестве замедлителя и теплоносителя. Канальные тяжеловодные реакторы CANDU. Частичные аксиальные	Всего аудиторных часов		
		3	6	0
		Онлайн		
		0	0	0

	перегрузки топлива. Параметры безопасности тяжеловодных реакторов. Коэффициенты и эффекты реактивности. Регулирование тяжеловодных реакторов. Перспективы использования оружейного плутония в реакторах CANDU. Дожигание отработавшего топлива реакторах с водой под давлением в реакторах типа CANDU. Тяжеловодные реакторы с легководным теплоносителем. Возможность использования газообразного теплоносителя в тяжеловодных реакторах.			
9-15	Часть 2	7	14	0
9 - 11	Реакторы на быстрых нейтронах. Реакторы на быстрых нейтронах. Особенности зависимости микросечений в области спектра деления - основа для создания реакторов на быстрых нейтронах. Основные нейтронно-физические преимущества реакторов на быстрых нейтронах. Понятие коэффициента воспроизводства и времени удвоения. Улучшенный нейтронный баланс и возможность расширенного воспроизводства топлива в БР. Гомогенные и гетерогенные компоновки БР. Выбор топлива и теплоносителя. Жидкометаллические БР. Реакторы с жестким спектром. Частичные перегрузки топлива и выравнивание поля энерговыделения. Стационарная система реакторов на быстрых и тепловых нейтронах в замкнутом топливном цикле. Обеспечение естественной безопасности в БР. Реакторы со свинцовым теплоносителем. Использование БР для трансмутации радиоактивных отходов.	Всего аудиторных часов		
		3	6	0
		Онлайн		
		0	0	0
12 - 15	Жидкосолевые реакторы. Жидкосолевые реакторы. Жидкосолевые реакторы - перспективная концепция реакторов с циркулирующим топливом. Основные преимущества ЖСР. Технологические особенности ЖСР проект жидкосолевого реактора бридера (MSBR). Топливный цикл ЖСР. Условия осуществления бридерного режима. Безопасность ЖСР. Перспективные проекты ЖСР.	Всего аудиторных часов		
		4	8	0
		Онлайн		
		0	0	0

Сокращенные наименования онлайн опций:

Обозначение	Полное наименование
ЭК	Электронный курс
ПМ	Полнотекстовый материал
ПЛ	Полнотекстовые лекции
ВМ	Видео-материалы
АМ	Аудио-материалы
Прз	Презентации
Т	Тесты
ЭСМ	Электронные справочные материалы
ИС	Интерактивный сайт

6. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

компетентностный подход предусматривает широкое использование в учебном процессе активных форм проведения занятий (разбор домашних заданий, система контрольно-измерительных материалов, включая тесты) в сочетании с внеаудиторной работой с целью формирования и развития профессиональных навыков студентов.

7. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

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

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

Компетенция	Индикаторы освоения	Аттестационное мероприятие (КП 1)
ПК-2.6	З-ПК-2.6	Э, КИ-8, КИ-15
	У-ПК-2.6	Э, КИ-8, КИ-15
	В-ПК-2.6	Э, КИ-8, КИ-15

Шкалы оценки образовательных достижений

Шкала каждого контрольного мероприятия лежит в пределах от 0 до установленного максимального балла включительно. Итоговая аттестация по дисциплине оценивается по 100-балльной шкале и представляет собой сумму баллов, заработанных студентом при выполнении заданий в рамках текущего и промежуточного контроля.

Итоговая оценка выставляется в соответствии со следующей шкалой:

Сумма баллов	Оценка по 4-ех балльной шкале	Оценка ECTS	Требования к уровню освоению учебной дисциплины
90-100	5 – «отлично»	A	Оценка «отлично» выставляется студенту, если он глубоко и прочно усвоил программный материал, исчерпывающе, последовательно, четко и логически стройно его излагает, умеет тесно увязывать теорию с практикой, использует в ответе материал монографической литературы.
85-89	4 – «хорошо»	B	Оценка «хорошо» выставляется студенту, если он твёрдо знает материал, грамотно и по существу излагает его, не допуская существенных неточностей в ответе на вопрос.
75-84		C	
70-74		D	
65-69	3 – «удовлетворительно»	E	Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если он имеет знания только основного материала, но не усвоил его деталей, допускает неточности, недостаточно правильные формулировки, нарушения логической последовательности в изложении
60-64			

			программного материала.
Ниже 60	2 – «неудовлетворительно»	F	Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, который не знает значительной части программного материала, допускает существенные ошибки. Как правило, оценка «неудовлетворительно» ставится студентам, которые не могут продолжить обучение без дополнительных занятий по соответствующей дисциплине.

8. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. 621.039 С12 Основы ядерной и радиационной безопасности на внешних этапах ядерного топливного цикла : учеб. пособие для вузов, Смирнов А.А., Савандер В.И., М.: МИФИ, 2006
2. 621.039 С12 Физическая теория ядерных реакторов Ч.1 Однородная размножающая среда и теория гетерогенных структур, Савандер В.И., : МИФИ, 2024
3. 621.039 Ш72 Физические основы обезвреживания долгоживущих радиоактивных отходов. Потенциал инновационных технологий : учебное пособие для вузов, Шмелев А.Н., Апсэ В.А., Куликов Г.Г., Москва: МИФИ, 2008
4. ЭИ Л50 Физические особенности и конструкция реактора ВВЭР-1000 : учебное пособие для вузов, Шелегов А.С., Лескин С.Т., Слободчук В.И., Москва: НИЯУ МИФИ, 2011
5. ЭИ Ш42 Физические особенности и конструкция реактора РБМК-1000 : учебное пособие для вузов, Шелегов А.С., Лескин С.Т., Слободчук В.И., Москва: НИЯУ МИФИ, 2011

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. 532 М87 Реологическое поведение концентрированных неньютоновских суспензий : , Иванов В.А., Мошев В.В., М.: Наука, 1990

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ:

Специальное программное обеспечение не требуется

LMS И ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСЫ:

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

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

9. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Специальное материально-техническое обеспечение не требуется

10. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ СТУДЕНТОВ

В процессе изучения курса главное внимание необходимо уделить тому факту, что конструктивные особенности реактора отвечают выбору замедлителя и теплоносителя. В этой связи необходимо знать классификацию реакторов по типу замедлителя, теплоносителя и спектру нейтронов. Безопасность реактора также определяется физическими характеристиками этих компонентов. Поэтому большое внимание необходимо уделять анализу внутренне присущих свойств безопасности реактора, за которые в первую очередь отвечают коэффициенты реактивности по температуре различных компонент активной зоны.

Эффективность использования топлива в реакторах на тепловых нейтронах различных типов в основном зависит от соотношения числа ядер замедлителя приходящихся на одно ядро топлива (вода-топливное отношение, графитто-топливное отношение), которое определяет жесткость спектра нейтронов в реакторе. Необходимо четко представлять себе, что всякое увеличение выгорания выгружаемого топлива при заданном его обогащении приводит к повышению коэффициента неравномерности энерговыделения. Поэтому необходимо находить компромисс между этими факторами.

Для реакторов на быстрых нейтронах всякое ужесточение спектра нейтронов приводит к возрастанию реактивности реактора. Одновременно это сопровождается повышением коэффициента воспроизводства. Величина коэффициента воспроизводства должна определяться из системных исследований всей ядерной энергетики в замкнутом топливном цикле.

11. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ПРЕПОДАВАТЕЛЕЙ

В вводной лекции охарактеризовать современные проблемы ядерной энергетики и дать классификацию ядерных реакторов по различным параметрам. Выделить основные характеристики ядерных реакторов.

Для реакторов водо-водяного типа дать основные свойства воды как замедлителя нейтронов. Напомнить зависимость сомножителей в формуле для коэффициента размножения от шага решетки. Подчеркнуть главную особенность реакторов этого типа – то, что замедлитель и теплоноситель одно и то же вещество и следовательно эти реакторы корпусного типа. При рассмотрении топливного цикла уделить внимание частичным перегрузкам топлива и системе компенсации избыточной реактивности как на основе борного регулирования, так и с применением выгорающих поглотителей. Показать влияние борного регулирования на плотностной эффект реактивности. Для кипящих реакторов уделить внимание вопросу стабилизации поля энерговыделения. Рассказать о современных тенденциях в развитии реакторов с водой под давлением.

В реакторах с графитовым замедлителем основное внимание уделить двум концепциям: водографитовые реакторы и газо-графитовые реакторы. Подчеркнуть, что разделение функций замедлителя и теплоносителя в водографитовых реакторах приводит к концепции канального реактора с возможностью осуществления перегрузок топлива без остановки реактора. Кроме того, вода в этих реакторах играет роль и поглотителя нейтронов и замедлителя. Поэтому необходимо показать влияние графито-топливного отношения на паровой коэффициент

реактивности, который играет значительную роль в обеспечении безопасности реакторов типа РБМК.

Указать, что газо-графитовые реакторы позволяют достичь существенно более высокого уровня КПД АЭС, а потому главное внимание уделить высокотемпературным газоохлаждаемым реакторам на тепловых нейтронах. Выделить две концепции развития этого направления, а именно: реакторы с шаровой засыпкой и реакторы с призматическими ТВС. Для реакторов с шаровой засыпкой обосновать возможность осуществления непрерывного аксиального движения топлива и возможность создания реакторов модульного типа с пассивным отводом тепла остаточного энерговыделения. Для призматической концепции рассмотреть возможность осуществления прямого газотурбинного цикла отвода тепла. С точки зрения эффективности топливоиспользования особо рассмотреть уран-ториевый топливный цикл.

Для тяжеловодных реакторов указать основное отличие тяжелой воды от обычной – это чрезвычайно слабое поглощение тепловых нейтронов но меньшая замедляющая способность. В результате тяжелую воду можно использовать в совокупности с природным ураном, но объемы тяжелой воды для замедления нейтронов существенно выше требуемого объема для теплоотвода. Замедлитель в этом реакторе находится в жидком состоянии без давления, так что реактор оказывается канального типа. Показать, что при использовании низкообогащенного топлива возможно заменить тяжеловодный теплоноситель на легководный. Канальность дает возможность применить перегрузку на ходу, без остановки реактора на перегрузку. Показать возможность использования регенерированного урана из реакторов типа ВВЭР для дожигания в реакторах типа CANDU.

При изложении материала по реакторам на быстрых нейтронах прежде всего выделить особенности поведения нейтронных сечений в области спектра деления. Улучшенный по сравнению с тепловой областью нейтронный баланс дает возможность расширенного воспроизводства ядерного топлива и вовлечение в топливный цикл всего урана и тория. Напомнить понятие коэффициента воспроизводства и времени удвоения для реакторов на быстрых нейтронах. Подчеркнуть, что выбор теплоносителя и топливной композиции оказывает определяющее влияние на КВ. Описать особенности жидкометаллических теплоносителей и газового теплоносителя. Уделить повышенное внимание коэффициентам и эффектам реактивности, особенно ПЭР для натриевых реакторов.

Автор(ы):

Савандер Владимир Игоревич, к.ф.-м.н., с.н.с.