

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

ОДОБРЕНО УМС ИЯФИТ

Протокол № 01/0821-573.1

от 31.08.2021 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ
ФИЗИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ РЕАКТОРОВ (МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ
ПРОЦЕССОВ И ТЕОРИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ)

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
7	5	180	32	48	16		23	16	Э
Итого	5	180	32	48	16	0	23	16	

АННОТАЦИЯ

Рассматриваются медленные нестационарные процессы в реакторах (ксеноновые переходные процессы, изменение нуклидного состава топлива и проблема воспроизводства), а также вопросы регулирования реакторов. Кроме того, излагаются основы теории возмущений и ценности нейтронов.

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Целью является ознакомление студентов с физикой, основами теории и методами анализа нейтронно-ядерных процессов, протекающих в ядерных реакторах.

Знания, полученные студентами при изучении дисциплины, необходимы для выполнения курсового проекта по ядерно-энергетическим установкам, дипломного проектирования, а также для последующей профессиональной деятельности в области проектирования и анализа ядерных реакторов различного целевого назначения.

Основной задачей изучения дисциплины является привитие студентам навыков самостоятельного анализа физических процессов и количественных оценок параметров критичности и безопасности реактора

2. МЕСТО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВО

Для успешного освоения материала студент должен владеть разделами

Ядерная физика.

Теория переноса нейтронов.

Линейная алгебра.

Уравнения математической физики.

3. ФОРМИРУЕМЫЕ КОМПЕТЕНЦИИ И ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ

Универсальные и(или) общепрофессиональные компетенции:

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенции
ОПК-5 [1] – Способен оформлять результаты работы и научно-исследовательской деятельности в виде статей, докладов, научных отчетов и презентаций с использованием систем компьютерной верстки и пакетов офисных программ	З-ОПК-5 [1] – Знать основы оформления результатов научно-исследовательской деятельности в виде статей, докладов, научных отчетов и презентаций с использованием систем компьютерной верстки и пакетов офисных программ. У-ОПК-5 [1] – Уметь оформлять результаты научно-исследовательской деятельности в виде статей, докладов, научных отчетов и презентаций с использованием систем компьютерной верстки и пакетов офисных программ. В-ОПК-5 [1] – Владеть навыками оформления результатов научно-исследовательской деятельности в виде статей, докладов, научных отчетов и презентаций с использованием систем компьютерной верстки и пакетов

офисных программ

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
научно-исследовательский			
Проведение расчетных исследований и измерений физических характеристик на экспериментальных стендах и установках	Атомный ледокольный флот Атомные электрические станции Плавучая АЭС Сфера научных исследований в области ядерной физики и технологий	ПК-1 [1] - способен 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 <i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 24.078	З-ПК-1[1] - Знать 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 ; У-ПК-1[1] - Уметь создавать теоретические и математические модели в профессиональной области ; В-ПК-1[1] - Владеть навыками работы с современными расчетными программными средствами
Проведение расчетных исследований и измерений физических характеристик на экспериментальных стендах и установках	Атомный ледокольный флот Атомные электрические станции Плавучая АЭС Сфера научных исследований в области ядерной физики и технологий	ПК-2 [1] - способен к созданию новых методов расчета современных реакторных установок и физических устройств, методов исследования теплофизических процессов и свойств реакторных материалов и теплоносителей;	З-ПК-2[1] - Знать методы исследования и расчета процессов, происходящих в реакторных установках ; У-ПК-2[1] - Уметь рассчитывать и проводить исследования процессов,

		разработке новых систем преобразования тепловой и ядерной энергии в электрическую, методов и методик оценки количественных характеристик ядерных материалов <i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 24.078	протекающих в реакторных установках ; В-ПК-2[1] - Владеть навыками применения информационных технологий при разработке новых установок, материалов и приборов
Проведение расчетных исследований и измерений физических характеристик на экспериментальных стендах и установках	Атомный ледокольный флот Атомные электрические станции Плавучая АЭС Сфера научных исследований в области ядерной физики и технологий	ПК-3 [1] - способен использовать фундаментальные законы в области физики атомного ядра и частиц, ядерных реакторов, термодинамики, гидродинамики и теплообмена в объеме достаточном для самостоятельного комбинирования и синтеза идей, творческого самовыражения <i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 24.078	З-ПК-3[1] - Знать основные законы в области физики атомного ядра и частиц, ядерных реакторов, термодинамики, гидродинамики и теплообмена ; У-ПК-3[1] - Уметь применять основные законы в области физики атомного ядра и частиц, ядерных реакторов, термодинамики, гидродинамики и теплообмена практической деятельности и исследовательской работе; В-ПК-3[1] - Владеть навыками анализа, синтеза и нахождения закономерностей при обработке экспериментальных данных

4. ВОСПИТАТЕЛЬНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ДИСЦИПЛИНЫ

Направления/цели воспитания	Задачи воспитания (код)	Воспитательный потенциал дисциплин
-----------------------------	-------------------------	------------------------------------

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>7 Семестр</i>						
1	Часть 1	1-8	16/24/8		25	КИ-8	3-ПК-1, У-ПК-1, В-ПК-1, 3-ПК-2, У-ПК-2, В-ПК-2, 3-ПК-3, У-ПК-3, В-ПК-3
2	Часть 2	9-16	16/24/8		25	КИ-16	3-ПК-1, У-ПК-1, В-ПК-1, 3-ПК-2, У-ПК-2, В-ПК-2, 3-ПК-3, У-ПК-3, В-ПК-3
	<i>Итого за 7 Семестр</i>		32/48/16		50		
	Контрольные мероприятия за 7 Семестр				50	Э	3-ПК-1, У-

							ПК-1, В- ПК-1, 3-ПК- 2, У- ПК-2, В- ПК-2, 3-ПК- 3, У- ПК-3, В- ПК-3
--	--	--	--	--	--	--	---

* – 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>7 Семестр</i>	32	48	16
1-8	Часть 1	16	24	8
1 - 2	Ценность нейтронов. Физический смысл асимптотической ценности нейтронов в условно-критическом реакторе. Газокинетическое уравнение для асимптотической ценности нейтронов в условно-критическом реакторе. Операторная форма записи уравнения ценности. Понятие сопряженных по Лагранжу операторов. Уравнение для асимптотической ценности в групповом диффузионном приближении.	Всего аудиторных часов		
		4	6	2
		Онлайн		
3 - 4	Теория малых возмущений. Общий вид теории малых возмущений для эффективного коэффициента размножения нейтронов. Основные преимущества использования формулы теории малых возмущений в задачах расчета реакторов. Формула теории малых возмущений для эффективного коэффициента размножения нейтронов в групповом диффузионном приближении. Уравнения точечной кинетики реактора на запаздывающих нейтронах с эффективными параметрами.	Всего аудиторных часов		
		4	6	2
		Онлайн		
5 - 6	Отравление реактора.	Всего аудиторных часов		

	Отравление ядерного реактора. Уравнения изменения концентраций йода и ксенона. Равновесные концентрации йода и ксенона. Стационарное отравление реактора. Запас реактивности на ксеноне при стационарном отравлении. Временное изменение концентраций йода и ксенона в переходных процессах. Отравление реактора при его остановке. Изменение эффективного коэффициента размножения. Шлакование реактора самарием.	4	6	2
		Онлайн		
7 - 8	Изменение нуклидного состава ядерного топлива в процессе работы реактора на мощности. Основные цепочки ядерных превращений. Уравнения изменения нуклидного состава топлива. Методы решений этих уравнений.	Всего аудиторных часов		
		4	6	2
		Онлайн		
9-16	Часть 2	16	24	8
9 - 10	Выгорание и зашлаковывание ядерного реактора. Различные подходы к определению выгорания топлива. Уравнения выгорания топлива. Оценка изменения эффективного коэффициента размножения реактора в процессе выгорания топлива. Пути достижения глубоких выгораний. Перегрузки топлива, применение "выгорающих" и "обгорающих" поглотителей.	Всего аудиторных часов		
		4	6	2
		Онлайн		
11 - 12	Конверсия и воспроизводство топлива в ядерных реакторах. Реакции, приводящие к образованию новых делящихся нуклидов. Урановый и ториевый топливные циклы. Коэффициент конверсии и коэффициент воспроизводства ядерного топлива. Балансные формулы для оценки коэффициентов конверсии и воспроизводства. Значение коэффициентов конверсии и воспроизводства в реакторах различных типов. Расширенное воспроизводство топлива в реакторах на быстрых нейтронах . Открытый и замкнутый топливные циклы.	Всего аудиторных часов		
		4	6	2
		Онлайн		
13 - 16	Регулирование реактора. Классификация органов регулирования. Эффективные граничные условия на поверхности регулирующего стержня. Предельные случаи: стержень с бесконечно малой и бесконечно большой кривизной поверхности. Изменение эффективного коэффициента размножения нейтронов при изменении геометрического параметра реактора. Эффективность центрального регулятора в цилиндрическом реакторе в одnogрупповом приближении. Распределение плотности нейтронов в активной зоне с центральным регулятором. Решетка регуляторов. Оптимальное размещение регуляторов. Эксцентрично расположенный регулятор. Интерференция регуляторов.	Всего аудиторных часов		
		8	12	4
		Онлайн		

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

ТЕМЫ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Недели	Темы занятий / Содержание
	<i>7 Семестр</i>
1 - 3	Отравление реактора. Отравление реактора.
4 - 10	Выгорание топлива. Влияние перегрузок. Выгорание топлива. Влияние перегрузок.

ТЕМЫ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

Недели	Темы занятий / Содержание
	<i>7 Семестр</i>
1 - 2	Использование теории малых возмущений для оценки изменения коэффициента размножения при изменении макросечений среды. Использование теории малых возмущений для оценки изменения коэффициента размножения при изменении макросечений среды.
3 - 5	Стационарное отравление реактора, зависимость от спектра нейтронов в реакторе. Оценка максимальной глубины "йодной ямы" после остановки реактора и времени ее достижения. Оценка отравления реактора по Стационарное отравление реактора, зависимость от спектра нейтронов в реакторе. Оценка максимальной глубины "йодной ямы" после остановки реактора и времени ее достижения. Оценка отравления реактора по теории возмущений. Исследование отравления реактора на компьютерных моделях.
6 - 8	Уравнения изменения нуклидного состава топлива и их решение. Расчет равновесного нуклидного состава. Коэффициент воспроизводства для реакторов на тепловых нейтронах. Зависимость коэффициента воспроизв Уравнения изменения нуклидного состава топлива и их решение. Расчет равновесного нуклидного состава. Коэффициент воспроизводства для реакторов на тепловых нейтронах. Зависимость коэффициента воспроизводства от состава реактора и спектра нейтронов в нем. Исследование изменения нуклидного состава топлива на компьютерных моделях.
9 - 10	Выгорание топлива в ядерном реакторе. Расчет выгорания. Влияние перегрузок топлива на выгорание. Исследование различных схем перегрузок топлива в реакторах с разным спектром на

	компьютерных моделях. Выгорание топлива в ядерном реакторе. Расчет выгорания. Влияние перегрузок топлива на выгорание. Исследование различных схем перегрузок топлива в реакторах с разным спектром на компьютерных моделях.
11 - 15	Способы воздействия на реактивность реактора. Получение выражения для эффективного радиуса поглощающего стержня в одно и двух групповом приближении. Сравнение и анализ результатов. Расчет поля нейтрон Способы воздействия на реактивность реактора. Получение выражения для эффективного радиуса поглощающего стержня в одно и двух групповом приближении. Сравнение и анализ результатов. Расчет поля нейтронов в активной зоне с поглотителями. Расчет решетки поглощающих стержней.

6. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Использование активных и интерактивных форм обучения с применением электронных ресурсов и информационных технологий. Использование традиционных образовательные технологии в виде аудиторных занятий в форме лекций, практических занятий, также самостоятельной работы студентов, связанных с решением задач по заданной тематике.

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-1	З-ПК-1	Э, КИ-8, КИ-16
	У-ПК-1	Э, КИ-8, КИ-16
	В-ПК-1	Э, КИ-8, КИ-16
ПК-2	З-ПК-2	Э, КИ-8, КИ-16
	У-ПК-2	Э, КИ-8, КИ-16
	В-ПК-2	Э, КИ-8, КИ-16
ПК-3	З-ПК-3	Э, КИ-8, КИ-16
	У-ПК-3	Э, КИ-8, КИ-16
	В-ПК-3	Э, КИ-8, КИ-16

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 – <i>«отлично»</i>	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 – <i>«хорошо»</i>	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 – <i>«удовлетворительно»</i>	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 программного материала.
60-64			
Ниже 60	2 – <i>«неудовлетворительно»</i>	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.

Оценочные средства приведены в Приложении.

8. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. ЭИ А 23 Nuclear power plants : учеб. пособие по англ. яз. для студентов-физиков, Москва: НИЯУ МИФИ, 2018
2. ЭИ М29 The Physics of Nuclear Reactors : , Cham: Springer International Publishing, 2017

3. ЭИ С12 Физическая теория ядерных реакторов Ч.1 Однородная размножающая среда и теория гетерогенных структур, , : МИФИ, 2007
4. 621.039 С12 Физическая теория ядерных реакторов Ч.1 Однородная размножающая среда и теория гетерогенных структур, , : МИФИ, 2007

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. 621.039 Ф36 Теория ядерных реакторов Т.1 Элементарная теория реакторов, , М.: Атомиздат, 1978
2. 51 Ш63 Высшая математика : Учеб. пособие для вузов, В.С. Шипачев, Москва: Высшая школа, 1990
3. 621.039 О-66 Статика неоднородного реактора : Текст лекций, Орлов В.В., М.: МИФИ, 1984
4. 621.039 О-66 Статика однородного ядерного реактора. Конспект лекций : Учеб. пособие, Орлов В.В., М.: МИФИ, 1983
5. 621.039 О-75 Основы теории и методы расчета ядерных энергетических реакторов : Учеб. пособие для вуза, Под. ред. Батя Г.А., М.: Энергоиздат, 1982

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

11. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ПРЕПОДАВАТЕЛЕЙ

Прежде всего, необходимо напомнить студентам основы физики деления ядер: дефект массы, энергия связи нуклонов в ядре, делимые и делящиеся нуклиды а также основные реакции нейтронов с ядрами. Опираясь на тот факт, что в процессе деления возникают нейтроны, дать понятие цепного процесса и его основной характеристики – коэффициента размножения, как отношения числа нейтронов в двух последовательных поколениях. Для бесконечной размножающей среды ввести другое определение , на основе отношения

скоростей процессов рождения и поглощения нейтронов и показать эквивалентность этих определений. Получить уравнение для спектра нейтронов в бесконечной размножающей среде и связать коэффициент размножения с спектральной характеристикой этого уравнения.

В зависимости от спектра нейтронов в размножающей среде провести классификацию на быстрые, промежуточные и тепловые реакторы. Для теплового реактора получить коэффициент размножения в виде формулы 4-х сомножителей. При расчете вероятности избежать резонансного поглощения нейтронов показать нелинейный характер явления, подчеркнуть разницу между резонансным и эффективным резонансным интегралом. Пояснить студентам важную роль Доплер-эффекта в резонансном поглощении, как основа внутренне присущей безопасности реактора. Рассмотреть зависимость сомножителей от разбавления размножающей среды.

Для гомогенных размножающих сред конечных размеров объяснить важность понятия материального параметра среды, как ее основной физической характеристики, и геометрического параметра, как свойства геометрии того объема, в котором размещена размножающая среда. Выделить условие критичности. Ввести понятие условно критического реактора и на его основе эффективного коэффициента размножения среды с утечкой нейтронов. Рассмотреть роль отражателя и его влияние на критический размер и распределение потока нейтронов и энергосвечения. Получить связь k_{eff} и β .

Для гетерогенных сред необходимо уделить внимание периодическим структурам, ввести понятия элементарной и эквивалентной ячейки реактора. Особо обратить внимание на метод эффективной гомогенизации гетерогенных структур. Обосновать роль метода вероятности первых столкновений для анализа физических эффектов, происходящих в элементарных ячейках. При изложении метода вероятности первых столкновений последовательно изложить понятия локальных вероятностей, метода плоских источников и плоских потоков для выражений этих вероятностей в гомогенных зонах.

Особо обратить внимание на резонансное поглощение нейтронов в гетерогенной среде и неравномерность распределения потока тепловых нейтронов по ячейке, выделив случаи тесных и широких ячеек. При рассмотрении коэффициента использования тепловых нейтронов ввести метод АБГ и получить связь вероятностей, используемых в этом методе и ранее введенных вероятностей первых столкновений. Необходимо подчеркнуть сложность усреднения коэффициента диффузии в замкнутой ячейке и необходимость использования для усреднения втекающие и вытекающие токи нейтронов.

При проведении практических занятий следует четко выделять основные физические особенности рассматриваемых процессов, уметь рисовать графики основных зависимостей для рассматриваемых физических параметров. При написании формул необходимо показывать четкое соответствие размерностей и типов величин.

Автор(ы):

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

