

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 «Теория переноса нейтронов»

**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 20\_\_

## **Цель освоения дисциплины**

**Целью изучения дисциплины** является формирование у студентов представлений, знаний, умений и навыков в области методов расчета нейтронных потоков и ценностей.

### **Задачи изучения дисциплины:**

- формирование знаний и умений, реализуемых в ходе эксплуатации ядерных реакторов и при проектировании систем управления и защиты;
- приобретение знаний об основах кинетического описания взаимодействия нейтронов с ядрами среды и выводом уравнения ценности;
- изучение метода нахождения групповых констант;
- ознакомление с многогрупповым методом расчета реакторов простых геометрий гомогенного состава;
- освоение теоретических, инженерных и методологических вопросов физики и техники управления (эксплуатации) ядерных реакторов, подкритических и критических стенов.

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 «Теория переноса нейтронов» требует основных компетенций, знаний, умений и навыков обучающегося, сформировавшихся при обучении по дисциплинам:

- общая физика (молекулярная физика и основы статистической термодинамики);
- обыкновенные дифференциальные уравнения;
- введение в специальность;
- ядерная физика;
- математический анализ;
- теория вероятностей и математическая статистика.

В ходе изучения дисциплины «Теория переноса нейтронов» обучающийся получает знания, умения и навыки для успешного изучения следующих дисциплин: «Физика ядерных реакторов»; «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**

В процессе освоения данной дисциплины у студента формируются следующие компетенции:

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, теоретического и экспериментального исследования	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 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 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.	- формирование психологической готовности к профессиональной деятельности по избранной профессии <b>(B15)</b>
<b>Профессиональное и трудовое воспитание</b>	- формирование культуры исследовательской и инженерной деятельности <b>(B16)</b>	Использование воспитательного потенциала дисциплин профессионального модуля для формирования инженерного мышления и инженерной культуры за счёт практических студенческих исследований современных производственных систем; проектной деятельности студентов по разработке и оптимизации технологических систем, связанной с решением реальных производственных задач; прохождения через разнообразные игровые, творческие, фестивальные формы, требующие анализа сложного объекта, постановки относительно него преобразовательных задач для их оптимального решения.	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 6-ом семестре. Общая трудоемкость дисциплины составляет 4 зачетных единицы, 144 ак. часа.

### Календарный план

№ раздела	№ темы	Наименование раздела/темы дисциплины	Виды учебной деятельности (час.)					Аттестация раздела (форма)	Максимальный балл за раздел
			Всего	Лекции	Лаборатор- ные	Практиче- ские	СРС		
1		<b>Раздел 1</b>						Т	30
	1	Общие характеристики взаимодействия нейтронов с ядрами	18	4	-	4	10		
	2	Перенос нейтронов. Общая теория	27	6	-	6	15		
	3	Диффузия нейтронов	25	6	-	4	15		
2		<b>Раздел 2</b>						УО	30
	4	Замедление нейтронов в бесконечных средах	27	6	-	6	15		
	5	Термализация нейтронов	20	4	-	6	10		
	6	Пространственное распределение замедляющихся нейтронов	27	6	-	6	15		
		Экзамен							40
<b>ИТОГО</b>			<b>144/ 24</b>	<b>32</b>	<b>-</b>	<b>32/24</b>	<b>80</b>		<b>100</b>

### Содержание лекционного курса

Темы лекции. Вопросы, отрабатываемые на лекции	Всего часов	Учебно- методическое обеспечение
1	2	3
<b>Общие характеристики взаимодействия нейтронов с ядрами.</b> Поток нейтронов, микроскопические и макроскопические сечения, плотность ядер в среде разного химического состава. Скорости реакций. Обзор нейтронных сечений. Области энергий нейтронов - тепловая, промежуточная, быстрая. Классификация ядер по атомному весу. Зависимости нейтронных сечений основных реакторных материалов.	4	1-5
<b>Перенос нейтронов. Общая теория.</b> Получение интегро-дифференциального уравнения переноса нейтронов в среде. Интегралы рассеяния и деления. Источники. Общие граничные условия. Уравнение переноса в интегральном виде. Вероятности пролета без столкновений. Эквивалентность двух форм уравнения переноса.	6	1-5
<b>Диффузия нейтронов.</b> Понятие о процессе диффузии в физике. Диффузия нейтронов. Параметры диффузии нейтронов - транспортное сечение, коэффициент диффузии. Условия применимости модели диффузии. Односторонние токи, суммарный ток. Вывод выражений для односторонних токов в среде, выражение	6	1-5

<p>суммарного тока. Закон Фика. Получение уравнения диффузии. Диффузионная длина. Граничные условия на границе раздела двух сред - непрерывность функций. Граничные условия на границе с вакуумом, экстраполированная длина.</p> <p>Уравнение диффузии в трех геометриях. Решение неоднородного уравнения для трех геометрий с источниками. Собственные функции однородного уравнения. Физический смысл длины диффузии. Среды с делением. Материальный параметр среды. Однородное уравнение диффузии для среды с делением. Общие решения уравнения в бесконечной среде и в конечном объеме.</p>		
<p><b>Замедление нейтронов в бесконечных средах.</b> Рассеяние нейтронов в системе координат - лабораторной и центра инерции. Связи скоростей, углов рассеяния. Предельные случаи лобового и скользящего столкновений. Максимальная потеря энергии, ступенька рассеяния, альфа. Изотропное рассеяние. Получения соотношения для закона рассеяния, его смысл. Равновероятное статистическое распределение рассеянных нейтронов. Получение средней энергии нейтронов; средней потери энергии при рассеянии. Летаргия, шкала летаргии. Вывод уравнения замедления в бесконечной среде для водорода без поглощения, водорода с поглощением, любого ядра без поглощения и с поглощением. Спектры замедляющихся нейтронов. Спектр Ферми. Получение выражения для вероятности избежать поглощения при замедлении. Резонансный интеграл. Бесконечный резонансный интеграл и эффективный резонансный интеграл. Зависимость эффективного резонансного интеграла от разбавления основного поглотителя ядрами среды и от температуры.</p>	6	1-5
<p><b>Термализация нейтронов.</b> Термализация нейтронов. Тепловое равновесие в среде. Спектр Максвелла. Поглощение, упругое и неупругое рассеяние при термализации. Когерентное и некогерентное рассеяние. Изменение Спектра Максвелла - диффузионный разогрев спектра. Учет разогрева спектра через температуру нейтронного газа. Предельные случаи. Усреднение сечений в тепловой области энергий.</p>	4	1-5
<p><b>Пространственное распределение замедляющихся нейтронов.</b> Модель непрерывного замедления. Связь времени замедления и летаргии. Решение нестационарного уравнения диффузии. Приближение возраста нейтронов. Уравнения возраста в среде без поглощения. Диффузионно-возрастное приближение. Возможность измерения возраста.</p>	6	1-5

### Перечень практических занятий

Тема практического занятия. Вопросы, отрабатываемые на практическом занятии	Всего часов	Учебно- методическое обеспечение
1	2	3
<p><b>Общие характеристики взаимодействия нейтронов с ядрами.</b> Микроскопические и макроскопические сечения взаимодействия. Плотность ядер в среде разного химического состава. Поток нейтронов. Скорости реакций. Энерговыделение при деле-</p>	4	1-5

нии.		
<b>Перенос нейтронов. Общая теория.</b> Длина свободного пробега. Транспортное микроскопическое сечение. Рассеяние нейтронов. Сечение разбавления. Число быстрых нейтронов, образующихся при одном поглощении теплового нейтрона в топливе.	6	1-5
<b>Диффузия нейтронов.</b> Ток нейтронов. Закон Фика. Коэффициент диффузии. Длина диффузии. Время диффузии нейтронов. Материальный параметр среды. Геометрический параметр. Коэффициент использования тепловых нейтронов.	4	1-5
<b>Замедление нейтронов в бесконечных средах.</b> Возраст нейтронов. Время замедления нейтронов. Замедляющая способность. Коэффициент замедления. Среднеарифметическая потеря энергии нейтронов за одно столкновение. Число соударения требуемых для замедления нейтронов до нужной энергии. Время жизни нейтронов. Вероятность избежать резонансного захвата в процессе замедления.	6	1-5
<b>Термализация нейтронов.</b> Температура нейтронного газа. Усреднение сечений в тепловой области энергий.	6	1-5
<b>Пространственное распределение замедляющихся нейтронов.</b> Коэффициент использования тепловых нейтронов. Вероятность избежать утечки в процессе диффузии. Вероятность избежать утечки в процессе замедления нейтронов. Условие критичности реактора.	6	1-5

### Перечень лабораторных работ - не предусмотрены учебным планом

#### Задания для самостоятельной работы студентов

Вопросы для самостоятельного изучения (задания)	Всего часов	Учебно- методическое обеспечение
1	2	3
<b>Общие характеристики взаимодействия нейтронов с ядрами.</b> Поток нейтронов, микроскопические и макроскопические сечения, плотность ядер в среде разного химического состава. Скорости реакций. Обзор нейтронных сечений. Области энергий нейтронов - тепловая, промежуточная, быстрая. Классификация ядер по атомному весу. Зависимости нейтронных сечений основных реакторных материалов.	10	1-5
<b>Перенос нейтронов. Общая теория.</b> Получение интегродифференциального уравнения переноса нейтронов в среде. Интегралы рассеяния и деления. Источники. Общие граничные условия. Уравнение переноса в интегральном виде. Вероятности пролета без столкновений. Эквивалентность двух форм уравнения переноса.	15	1-5
<b>Диффузия нейтронов.</b> Понятие о процессе диффузии в физике. Диффузия нейтронов. Параметры диффузии нейтронов - транспортное сечение, коэффициент диффузии. Условия применимости модели диффузии. Односторонние токи, суммарный ток. Вывод выражений для односторонних токов в среде, выражение суммарного тока. Закон Фика. Получение	15	1-5

<p>уравнения диффузии. Диффузионная длина. Граничные условия на границе раздела двух сред - непрерывность функций. Граничные условия на границе с вакуумом, экстраполированная длина.</p> <p>Уравнение диффузии в трех геометриях. Решение неоднородного уравнения для трех геометрий с источниками. Собственные функции однородного уравнения. Физический смысл длины диффузии. Среды с делением. Материальный параметр среды. Однородное уравнение диффузии для среды с делением. Общие решения уравнения в бесконечной среде и в конечном объеме.</p>		
<p><b>Замедление нейтронов в бесконечных средах.</b> Рассеяние нейтронов в системе координат - лабораторной и центра инерции. Связи скоростей, углов рассеяния. Предельные случаи лобового и скользящего столкновений. Максимальная потеря энергии, ступенька рассеяния, альфа. Изотропное рассеяние. Получения соотношения для закона рассеяния, его смысл. Равновероятное статистическое распределение рассеянных нейтронов. Получение средней энергии нейтронов; средней потери энергии при рассеянии. Летаргия, шкала летаргии. Вывод уравнения замедления в бесконечной среде для водорода без поглощения, водорода с поглощением, любого ядра без поглощения и с поглощением. Спектры замедляющихся нейтронов. Спектр Ферми. Получение выражения для вероятности избежать поглощения при замедлении. Резонансный интеграл. Бесконечный резонансный интеграл и эффективный резонансный интеграл. Зависимость эффективного резонансного интеграла от разбавления основного поглотителя ядрами среды и от температуры.</p>	15	1-5
<p><b>Термализация нейтронов.</b> Термализация нейтронов. Тепловое равновесие в среде. Спектр Максвелла. Поглощение, упругое и неупругое рассеяние при термализации. Когерентное и некогерентное рассеяние. Изменение Спектра Максвелла - диффузионный разогрев спектра. Учет разогрева спектра через температуру нейтронного газа. Предельные случаи. Усреднение сечений в тепловой области энергий.</p>	10	1-5
<p><b>Пространственное распределение замедляющихся нейтронов.</b> Модель непрерывного замедления. Связь времени замедления и летаргии. Решение нестационарного уравнения диффузии. Приближение возраста нейтронов. Уравнения возраста в среде без поглощения. Диффузионно-возрастное приближение. Возможность измерения возраста.</p>	15	1-5

**Расчетно-графическая работа не предусмотрена учебным планом**

**Курсовая работа не предусмотрена учебным планом**

### **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 «Теория переноса нейтронов» 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
<b>Входной контроль</b>			
1	Входной контроль		Вопросы входного контроля (устно)
<b>Аттестация разделов, текущий контроль успеваемости</b>			
1	Раздел 1	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	Раздел 2	З-ОПК-1, У-ОПК-1, В-ОПК-1, З-ПК-9, У-ПК-9, В-ПК-9	Практические занятия Опрос в форме устного собеседования
<b>Промежуточная аттестация</b>			
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.

### Шкала оценивания обучающегося на входном контроле

Требования к знаниям, умениям и навыкам обучающегося	Баллы рейтинговой оценки
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

#### Тест по разделу 1

1. Нуклид – это
  - А) Молекула определенного состава
  - Б) Химический элемент с определенным номером
  - В) Ядро с определенным числом протонов и нейтронов
2. Наибольшей (по модулю) энергией связи обладают ядра с массовым числом А) 1-10
  - Б) 50-60
  - В) 200-240
3. Альфа-активные ядра находятся на карте изотопов в области
  - А) Легких ядер
  - Б) Средних ядер

В) Тяжелых элементов

4. Образование электрон-позитронной пары возможно для фотонов энергий

А) Любых

Б) Более, чем энергия, соответствующая массе покоя электрона

В) Более, чем удвоенная энергия, соответствующая массе покоя электрона

Г) Такая реакция невозможна

5. Укажите неизвестную частицу в реакции

А) Вторичный нейтрон

Б) Протон

В) Позитрон

Г) Электрон

6. Плотность потока нейтронов (или иных частиц) – это

А) Число нейтронов, пересекающих выбранную элементарную площадку в пространстве в определенном направлении в единицу времени

Б) Число нейтронов, испускаемых выбранной точкой пространства в единицу времени

В) Число нейтронов, пересекающих во всех направлениях поверхность элементарной сферы в единицу времени

7. Микросечение захвата большинства ядер зависит от энергии как

А)  $\sigma_a = \text{const} \cdot (E)^{-0.5}$

Б)  $\sigma_a = \text{const} \cdot (E)^{-1}$

В)  $\sigma_a = \text{const} \cdot (v)^{-2}$ , где  $v$  – скорость нейтронов

8. В среде имеется концентрация тепловых нейтронов (с энергией 0,025 эВ), равная  $10^{10}$ . Найдите плотность потока нейтронов? Массу нейтрона принять приблизительно  $1,675 \cdot 10^{-27}$  кг. Постоянная Больцмана  $k = 8.62 \cdot 10^{-5}$  эВ/К.

А)  $\Phi = 2,2 \cdot 10^{15} \text{ 1/(см}^2 \cdot \text{с)}$

Б)  $\Phi = 2,2 \cdot 10^{13} \text{ 1/(см}^2 \cdot \text{с)}$

В) Данных для решения задачи недостаточно, необходима скорость нейтронов

9. Наибольшая часть энергии, выделяющейся при делении ядра, высвобождается в форме

А) Кинетической энергии мгновенных нейтронов деления

Б) Кинетической энергии осколков деления

В) Энергии мгновенных гамма-квантов

Г) Энергии бета- и гамма- распадов осколков деления

10. Транспортная длина – это

А) Средняя длина, на которую смещается тепловой нейтрон из точки рождения до точки поглощения

Б) Средняя длина, на которую смещается тепловой нейтрон из точки рождения до точки поглощения в первоначальном направлении

В) Средняя длина, на которую смещается тепловой нейтрон из точки рождения в первоначальном направлении за бесконечное число столкновений в поглощающей среде

11. Пороговые нуклиды

А) Это нуклиды, которые эффективно делятся нейтронами с энергией не ниже порога

Б) Это нуклиды, которые эффективно делятся нейтронами с энергией не выше порога

В) Это нуклиды, которые при делении испускают нейтроны с энергией не выше порога

12. Запаздывающие нейтроны появляются

А) Из осколков деления, имеющих избыточное число нейтронов

Б) Из ядер топлива, претерпевающих спонтанное деление

В) После процесса замедления на легких ядрах

13. Выберите выражение, не имеющее отношение к диффузионному приближению

А) Нейтрон-нейтронным взаимодействием пренебрегают

Б) Среда считается гомогенной, слабопоглощающей

В) Нейтроны имеют одну и ту же среднюю энергию

Г) Среда состоит из одного и того же вида ядер

14. Для управляемого набора мощности

А) коэффициент размножения не должен превышать единицу

Б) коэффициент размножения на мгновенных нейтронах не должен превышать единицу

В) коэффициент размножения на мгновенных нейтронах не должен превышать  $1+\beta$ ,

где  $\beta$  – доля запаздывающих нейтронов.

Г) коэффициент размножения не должен превышать  $1-\beta$ .

15. Плотность потока нейтронов (или иных частиц) – это

А) Число нейтронов, пересекающих выбранную элементарную площадку в пространстве в определенном направлении в единицу времени

Б) Число нейтронов, испускаемых выбранной точкой пространства в единицу времени

В) Число нейтронов, пересекающих во всех направлениях поверхность элементарной сферы в единицу времени

16. Микросечение захвата большинства ядер зависит от энергии как

А)  $\sigma_a = \text{const} \cdot (E)^{-0.5}$

Б)  $\sigma_a = \text{const} \cdot (E)^{-1}$

В)  $\sigma_a = \text{const} \cdot (v)^{-2}$ , где  $v$  – скорость нейтронов

17. В среде имеется концентрация тепловых нейтронов (с энергией 0,025 эВ), равная  $10^{10}$ . Найдите плотность потока нейтронов? Массу нейтрона принять приближенно  $1,675 \cdot 10^{-27}$  кг. Постоянная Больцмана  $k=8.62 \cdot 10^{-5}$  эВ/К.

А)  $\Phi = 2,2 \cdot 10^{15} \text{ 1/(см}^2 \cdot \text{с)}$

Б)  $\Phi = 2,2 \cdot 10^{13} \text{ 1/(см}^2 \cdot \text{с)}$

18. Транспортная длина – это

А) Средняя длина, на которую смещается тепловой нейтрон из точки рождения до точки поглощения.

Б) Средняя длина, на которую смещается тепловой нейтрон из точки рождения до точки поглощения в первоначальном направлении

В) Средняя длина, на которую смещается тепловой нейтрон из точки рождения в первоначальном направлении за бесконечное число столкновений в непоглощающей среде

19. Выберите выражение, не имеющее отношение к диффузионному приближению

А) Нейтрон-нейтронным взаимодействием пренебрегают

Б) Среда считается гомогенной, слабопоглощающей

В) Нейтроны имеют одну и ту же среднюю энергию

Г) Среда состоит из одного и того же вида ядер

20. Определите плотность потока нейтронов  $\Phi$  от точечного изотропного источника нейтронов мощностью  $q$  на расстоянии  $R$  от него в вакууме.

А)  $\Phi = \frac{q}{4\pi R^2}$

Б)  $\Phi = q \times 4\pi R^2$

В)  $\Phi = \frac{q}{\pi R^2}$

### Шкала оценивания обучающегося на тесте

Каждый тест содержит по 20 вопросов. За каждый правильный ответ начисляется 1 балл. При ответе студента менее чем на 60% вопросов, тестовое задание не зачитывается и у студента образуется долг, который должен быть закрыт в течении семестра или на зачетной неделе.

## Раздел 2

### Вопросы для устного опроса по разделу

1. Кинематика столкновений. Центр масс (инерции) и определение его положения.
2. Рассеяние (замедление) нейтронов на ядрах среды в ЛСК и СЦИ.
3. Изо- и анизотропное рассеяние. Транспортные величины.
4. Зависимость потери энергии от угла рассеяния и массового числа. Минимальная и максимальная потеря энергии.
5. Ступенька замедления.
6. Функция распределения рассеянного нейтрона по энергии (летаргии) в пределах ступеньки замедления.
7. Среднелогарифмическая потеря энергии в одном столкновении. Летаргия.
8. Замедляющая и поглощающая способность среды. Коэффициент замедления среды.
9. Достоинства и недостатки применяемых замедлителей.
10. Уравнение замедления нейтронов в бесконечной среде.
11. Энергетическое распределение замедляющихся нейтронов в бесконечной однородной не поглощающей среде для легких ядер (водорода), тяжелых ядер и смеси ядер. Спектр Ферми.
12. Замедление на легких ядрах (водороде,  $A=1$ ) с поглощением. Вероятность избежать поглощения при замедлении нейтронов.
13. Замедление на тяжелых ядрах ( $A>1$ ) с поглощением.
14. Модель непрерывного замедления. Уравнение замедления в диффузионном приближении и диффузионно-возрастном приближении.
15. Возраст нейтронов.
16. Уравнение возраста, граничные и прочие условия для нахождения решения уравнения возраста.
17. Время замедления и время диффузии нейтронов.
18. Мгновенные и запаздывающие нейтроны. Время жизни поколения.
19. Длина диффузии и длина миграции. Площадь миграции.
20. Методика оценочного расчета возраста и времени замедления нейтронов в различных средах.
21. Нейтронный цикл в ядерном реакторе.
22. Формула четырех сомножителей.
23. Эффективный коэффициент размножения нейтронов для бесконечной и конечной сред.
24. Различные условия критичности ЯР.

### 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. Общая классификация элементарных частиц. Молекула. Атом. Ядро. Понятие «элемент», «нуклид». Свойства ядерных сил. Изотопы, изотоны, изобары. Зеркальные ядра. База нуклидов JANIS

2. Модели ядра. Свойства ядерных сил. Дефект массы и энергия связи.
3. Зависимость удельной энергии связи от массового числа. Энергетический спектр ядер. Изомеры.
4. Радиоактивность и ее виды. Активность изотопов. Закон радиоактивного распада. Радиоактивное равновесие. Альфа- и бета-распад, их особенности.
5. Воздействие ионизирующего излучения на организм. Дозы излучения. Последствия
6. Взаимодействие излучения с атомами и ядрами (фотоэффект, комптон-эффект, фотоядерная реакция, рождение электрон-позитронных пар). Эффект Мёссбауэра.
7. Ядерные реакции. Прямое взаимодействие. Составное ядро. Эффективное микросечение реакции данного вида  $\sigma$ . Закон  $1/v$  для микросечений. База нейтронных сечений JANIS.
8. Особенности реакций под действием заряженных частиц. Туннелирование, надбарьерное отражение.
9. Виды нейтронных реакций. Резонансные реакции. Источники нейтронов и их принцип действия.
10. Сырьевые (воспроизводящие, пороговые, делимые) нуклиды. Топливные или делящиеся нуклиды.
11. Реакция деления. Цепная реакция деления. Зависимость удельного выхода от массового числа ядер-осколков. Наиболее вероятное отношение масс и энергий осколков.
12. Цепная реакция деления. Распределение энергии при распаде топливного ядра. Механизм образования тепла в ядерном реакторе (ЯР).
13. Классификация ядерных реакторов. Схемы АЭС.
14. Эффективный коэффициент размножения нейтронов. Реактивность. Кинетика на мгновенных нейтронах.
15. Запаздывающие нейтроны. Роль мгновенных и запаздывающих нейтронов в управлении ЯР. Период реактора.
16. Выгорание топлива в ядерном реакторе. Отравление ксеноном (кратко).
17. 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.
18. Характеристики нейтронного поля: спектр нейтронов, плотность нейтронов, плотность потока нейтронов, плотность тока нейтронов. Флюенс.
19. Скорость реакции данного вида для моноэнергетических нейтронов. Макроскопическое сечение.
20. Длина свободного пробега нейтронов. Физический смысл этих величин. Слабо- и сильнопоглощающая нейтроны среда.
21. Диффузия нейтронов. Закон Фика для нейтронов. Диффузионное приближение, условия его применимости. Выражения для односторонних токов нейтронов.
22. Транспортная длина рассеяния, транспортная длина и макросечение. Использование транспортных величин в уравнении диффузии
23. Утечка, поглощение и генерация нейтронов. Баланс нейтронов.
24. Уравнение диффузии для неделящейся (слабоделящейся) и размножающей среды. Длина диффузии. Материальный параметр реактора.
25. Интегральное уравнение для потока моноэнергетических нейтронов Пайерлса и кинетическое уравнение Больцмана (ознакомительно).
26. Граничные и прочие условия для нахождения решения уравнения диффузии для элементарных геометрий. Экстраполированная граница и экстраполированная длина. Методика решения уравнения диффузии.

27. Пример решения уравнения диффузии для неразмножающей среды в случае сферической симметрии с точечным источником нейтронов в центре. Длина диффузии, ее смысл.
28. Общее решение уравнения диффузии в случае неразмножающей среды для плоской геометрии (голый ЯР – без отражателя).
29. Влияние отражателя. Альбедо.
30. Одногрупповое (односкоростное) диффузионное приближение. Понятие о многогрупповом приближении.
31. 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.
32. 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.
33. Среднелогарифмическая потеря энергии в одном столкновении. Летаргия. Замедляющая и поглощающая способность среды. Коэффициент замедления среды. Достоинства и недостатки применяемых замедлителей.
34. Уравнение замедления нейтронов в бесконечной среде. Энергетическое распределение замедляющихся нейтронов в бесконечной гомогенной непоглощающей среде для легких ядер (водорода), тяжелых ядер и смеси ядер. Спектр Ферми.
35. Замедление на легких ядрах (водороде,  $A=1$ ) с поглощением. Вероятность избежать поглощения при замедлении нейтронов. Замедление на тяжелых ядрах ( $A>1$ ) с поглощением.
36. Модель непрерывного замедления. Уравнение замедления в диффузионном приближении и диффузионно-возрастном приближении. Возраст нейтронов. Уравнение возраста, граничные и прочие условия для нахождения решения уравнения возраста.
37. Время замедления и время диффузии нейтронов. Мгновенные и запаздывающие нейтроны. Время жизни поколения. Длина диффузии и длина миграции. Площадь миграции. Методика оценочного расчета возраста и времени замедления нейтронов в различных средах.
38. Нейтронный цикл в ядерном реакторе. Формула четырех сомножителей. Эффективный коэффициент размножения нейтронов для бесконечной и конечной сред. Различные условия критичности ЯР.

#### **Шкала оценивания обучающегося на экзамене**

<b>Уровень освоения материала</b>	<b>Оценка (стандартная)</b>	<b>Баллы рейтинговой оценки</b>
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 «Теория переноса нейтронов»:

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. Баранник, А. А. Лекции по курсу "Теория переноса нейтрона : учебное пособие / А. А. Баранник. — Москва : НИЯУ МИФИ, 2012. — 164 с. <https://e.lanbook.com/reader/book/75925/#1>



3. Кадилин, В. В. Прикладная нейтронная физика : учебное пособие / В. В. Кадилин, Е. В. Рябева, В. Т. Самосадный. — Москва: НИЯУ МИФИ, 2011. — 124 с. <https://e.lanbook.com/reader/book/75893/#2>

#### Дополнительная литература:

4. Колесов, В. В. Файлы ядерных данных и их использование в нейтронно-физических расчетах : учебное пособие / В. В. Колесов, М. Ю. Терновых, Г. В. Тихомиров. — Москва : НИЯУ МИФИ, 2014. — 68 с. <https://e.lanbook.com/reader/book/103227/#2>

5. 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>

### **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



Чернова Н.М.

Рецензент: доцент



Подгорнов А.А.

Программа одобрена на заседании УМКС 14.05.02 Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг от 15.11.2021 года, протокол №2.

Председатель учебно-методической комиссии



Ляпин А.С.