


МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
(ФГБОУ ВО «ВГУ»)

**УТВЕРЖДАЮ**

Заведующий кафедрой  
ядерной физики

 Титова Л. В.  
22.04.2024 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

**Б1.В.04 Теория переноса излучений**

**1. Код и наименование специальности:**

14.05.02 Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг

**2. Специализация:**

Проектирование и эксплуатация атомных станций

**3. Квалификация выпускника:** инженер – физик

**4. Форма обучения:** очная

**5. Кафедра, отвечающая за реализацию дисциплины:**

кафедра ядерной физики

**6. Составители программы:**

д.ф.-м.н., профессор, Кадменский Станислав Георгиевич, к.ф.-м.н., доцент Долгополов  
Михаил Анатольевич

**7. Рекомендована:**

Научно – методическим советом физического факультета, протокол №4 от 18.04.2024 г.

**8. Учебный год:** 2026-2027

**Семестр(ы):** 5

## 9. Цели и задачи учебной дисциплины

*Целями освоения учебной дисциплины являются:*

- ознакомление студентов с основными закономерностями распространения заряженных частиц, фотонов и нейтронов в различных средах, изучение методов расчета характеристик взаимодействия, приобретение умений выполнять расчеты характеристик прохождения ионизирующих излучений в веществе.

*Задачи учебной дисциплины:*

- изучить фундаментальные понятия, базовые модели, принципы и математические методы теории переноса излучений, а также границы их применимости

- научиться выделять конкретное «физическое» содержание в прикладных задачах переноса излучений, проводить анализ полученных результатов, ставить и решать конкретные задачи переноса излучений

- овладеть методами расчета характеристик потоков частиц в веществе как аналитическими, так и численными, с приложениями к решению типовых задач по переносу излучений

## 10. Место учебной дисциплины в структуре ООП:

Учебная дисциплина Теория переноса излучений относится к вариативной части Блока 1.

## 11. Планируемые результаты обучения по дисциплине/модулю (знания, умения, навыки), соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями) и индикаторами их достижения:

Код	Название компетенции	Код(ы)	Индикатор(ы)	Планируемые результаты обучения
ПК-1	Способен проводить производственно - технологические исследования систем и оборудования атомных электрических станций и ядерных энергетических установок, участвовать во внедрении результатов исследований	ПК-1.3	Владеет решением математических, физических и химических задач в комплексной инженерной деятельности	Знать: основы теории переноса излучений  Уметь: использовать основные законы теории переноса излучений для составления математического описания объекта моделирования;  Владеть: самостоятельно выполнять теоретические расчеты при решении научных и исследовательских задач с использованием современных методов; выбирать адекватные конкретной задаче методы описания и расчета характеристик взаимодействия излучений с веществом.
ПК-6	Способен анализировать нейтронно-физические, технологические процессы и алгоритмы контроля, диагностики, управления и защиты в стационарных и нестационарных режимах работы, обеспечивать	ПК-6.2	Проводит нейтронно-физические и теплогидравлические расчеты оборудования АС и его элементов в стационарных и нестационарных режимах работы	

	оптимальные режимы работы ядерного реактора, тепломеханического оборудования и энергоблока АС			
ПК-8	Способен выполнять индивидуальный дозиметрический контроль облучения персонала организации атомной отрасли, обрабатывать результаты радиационного контроля организации атомной отрасли	ПК-8.1	Знает основные свойства радиационного излучения и методы их регистрации, способы защиты от ионизирующих излучений	
		ПК-8.3	Знает принцип действия, конструкции и правила технической эксплуатации средств дозиметрического контроля и детекторов ионизирующих излучений	

**12. Объем дисциплины в зачетных единицах/час. — 6/216.**

**Форма промежуточной аттестации - экзамен**

**13. Трудоемкость по видам учебной работы**

Вид учебной работы	Трудоемкость	
	Всего	По семестрам
		5 семестр
Аудиторные занятия	84	84
в том числе:	лекции	34
	практические	16
	лабораторные	34
Самостоятельная работа	96	96
Форма промежуточной аттестации	36	Экзамен (36 ч)
Итого:	216	216

**13.1. Содержание дисциплины**

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Содержание раздела дисциплины	Реализация раздела дисциплины с помощью онлайн-курса, ЭУМК*
<b>1. Лекции</b>			
1.1	Дифференциальные и интегральные характеристики излучений.	Активность радионуклида. Постоянная распада и период полураспада. Поточковые и токовые характеристики поля излучений и единицы их измерения. Понятие элементарной сферы. Флюенс частиц. Плотность тока частиц вдоль заданного направления. Дважды дифференциальные по углам и энергии сечения рассеяния. Макроскопическое сечение взаимодействия (линейный коэффициент ослабления), длина свободного пробега, слой половинного ослабления.	<a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29237">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29237</a>

1.2	Элементарные акты взаимодействия излучений с веществом.	Взаимодействие электронов и других заряженных частиц с веществом. Ионизационные и радиационные потери, формула Бете-Гайтлера. Взаимодействие фотонов с веществом. Фотоэффект, комптоновское рассеяние, образование электронно-позитронных пар. Взаимодействие нейтронов с веществом. Классификация нейтронов по энергиям. Стадии протекания ядерных реакций с участием нейтронов. Кинематика рассеяния нейтронов. Макроскопические сечения поглощения и деления.	<a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29237">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29237</a>
1.3	Уравнение переноса.	Интегро-дифференциальная форма уравнения переноса (кинетическое уравнение Больцмана). Граничные условия. Уравнение переноса для плоской, цилиндрической и сферической геометрии. Свойства уравнения переноса. Интегральная форма уравнения переноса (уравнение Пайерлса).	<a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29237">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29237</a>
1.4	Аналитические методы решения уравнения переноса.	Элементарная теория диффузии. $N$ $P$ - разложение. Транспортное сечение и сечение поглощения. Коэффициент и длина диффузии. Закон Фика. Функция влияния точечного источника. Сферический и цилиндрический поверхностные источники. Пределы применимости диффузной теории.	<a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29237">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29237</a>
1.5	Особенности описания переноса нейтронов.	Теория замедления. Уравнение для плотности столкновения и его решение. Приближение непрерывного замедления. Летаргия, плотность замедления и возраст. Теория возраста. Уравнение возраста. Условие применимости возрастной теории. Метод последовательных столкновений. Представление плотности полного потока частиц в методе последовательных столкновений. Плотности потоков одно- и двухкратно рассеянных частиц в односкоростном приближении.	<a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29237">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29237</a>
1.6	Алгоритмы статистического моделирования переноса заряженных частиц.	Метод «укрупненных соударений». Многократное кулоновское рассеяние. Распределение Мольера и Гаудсмита-Саундерсона. Флуктуации ионизационных и радиационных потерь. Каскады частиц. Особенности потерь энергии тяжелых заряженных частиц в веществе. Пик Брэгга	<a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29237">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29237</a>
1.7	Алгоритмы статистического моделирования переноса гамма-излучения.	Взаимодействие фотонов с веществом. Фотоэффект, комптоновское рассеяние, образование электронно-позитронных пар. Спектрально-угловые характеристики вторичных фотонов и электронов (позитронов).	<a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29237">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29237</a>
<b>2. Практические занятия</b>			
2.1	Дифференциальные и интегральные характеристики излучений.	Активность радионуклида. Постоянная распада и период полураспада. Поточковые и токовые характеристики поля излучений и единицы их измерения. Понятие элементарной сферы. Флюенс частиц. Плотность тока частиц вдоль заданного направления. Дважды дифференциальные по углам и энергии сечения рассеяния. Макроскопическое сечение взаимодействия (линейный коэффициент ослабления), длина свободного пробега, слой половинного ослабления.	<a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29237">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29237</a>
2.2	Элементарные акты взаимодействия излучений с веществом.	Взаимодействие электронов и других заряженных частиц с веществом. Ионизационные и радиационные потери, формула Бете-Гайтлера. Взаимодействие фотонов с веществом. Фотоэффект, комптоновское рассеяние, образование электронно-позитронных пар. Взаимодействие нейтронов с веществом.	<a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29237">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29237</a>

		Классификация нейтронов по энергиям. Стадии протекания ядерных реакций с участием нейтронов. Кинематика рассеяния нейтронов. Макроскопические сечения поглощения и деления.	
2.3	Уравнение переноса.	Интегро-дифференциальная форма уравнения переноса (кинетическое уравнение Больцмана). Граничные условия. Уравнение переноса для плоской, цилиндрической и сферической геометрии. Свойства уравнения переноса. Интегральная форма уравнения переноса (уравнение Пайерлса).	<a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29237">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29237</a>
2.4	Аналитические методы решения уравнения переноса.	Элементарная теория диффузии. $N$ $P$ - разложение. Транспортное сечение и сечение поглощения. Коэффициент и длина диффузии. Закон Фика. Функция влияния точечного источника. Сферический и цилиндрический поверхностные источники. Пределы применимости диффузной теории.	<a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29237">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29237</a>
2.5	Особенности описания переноса нейтронов.	Теория замедления. Уравнение для плотности столкновения и его решение. Приближение непрерывного замедления. Летаргия, плотность замедления и возраст. Теория возраста. Уравнение возраста. Условие применимости возрастной теории. Метод последовательных столкновений. Представление плотности полного потока частиц в методе последовательных столкновений. Плотности потоков одно- и двухкратно рассеянных частиц в односкоростном приближении.	<a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29237">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29237</a>
2.6	Алгоритмы статистического моделирования переноса заряженных частиц.	Метод «укрупненных соударений». Многократное кулоновское рассеяние. Распределение Мольер и Гаудсмита-Саундерсона. Флуктуации ионизационных и радиационных потерь. Каскады частиц. Особенности потерь энергии тяжелых заряженных частиц в веществе. Пик Брэгга	<a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29237">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29237</a>
2.7	Алгоритмы статистического моделирования переноса гамма-излучения.	Взаимодействие фотонов с веществом. Фотоэффект, комптоновское рассеяние, образование электронно-позитронных пар. Спектрально-угловые характеристики вторичных фотонов и электронов (позитронов).	<a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29237">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29237</a>
<b>3. Лабораторные занятия</b>			
3.1	Дифференциальные и интегральные характеристики излучений.	Активность радионуклида. Постоянная распада и период полураспада. Поточковые и токовые характеристики поля излучений и единицы их измерения. Понятие элементарной сферы. Флюенс частиц. Плотность тока частиц вдоль заданного направления. Дважды дифференциальные по углам и энергии сечения рассеяния. Макроскопическое сечение взаимодействия (линейный коэффициент ослабления), длина свободного пробега, слой половинного ослабления.	<a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29237">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29237</a>
3.2	Элементарные акты взаимодействия излучений с веществом.	Взаимодействие электронов и других заряженных частиц с веществом. Ионизационные и радиационные потери, формула Бете-Гайтлера. Взаимодействие фотонов с веществом. Фотоэффект, комптоновское рассеяние, образование электронно-позитронных пар. Взаимодействие нейтронов с веществом. Классификация нейтронов по энергиям. Стадии протекания ядерных реакций с участием нейтронов. Кинематика рассеяния нейтронов. Макроскопические сечения поглощения и деления.	<a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29237">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29237</a>
3.3	Уравнение переноса.	Интегро-дифференциальная форма уравнения переноса (кинетическое уравнение Больцмана). Граничные условия. Уравнение переноса для	<a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29237">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29237</a>

		плоской, цилиндрической и сферической геометрии. Свойства уравнения переноса. Интегральная форма уравнения переноса (уравнение Пайерлса).	
3.4	Аналитические методы решения уравнения переноса.	Элементарная теория диффузии. N P - разложение. Транспортное сечение и сечение поглощения. Коэффициент и длина диффузии. Закон Фика. Функция влияния точечного источника. Сферический и цилиндрический поверхностные источники. Пределы применимости диффузной теории.	<a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29237">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29237</a>
3.5	Особенности описания переноса нейтронов.	Теория замедления. Уравнение для плотности столкновения и его решение. Приближение непрерывного замедления. Летаргия, плотность замедления и возраст. Теория возраста. Уравнение возраста. Условие применимости возрастной теории. Метод последовательных столкновений. Представление плотности полного потока частиц в методе последовательных столкновений. Плотности потоков одно- и двукратно рассеянных частиц в односкоростном приближении.	<a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29237">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29237</a>
3.6	Алгоритмы статистического моделирования переноса заряженных частиц.	Метод «укрупненных соударений». Многократное кулоновское рассеяние. Распределение Мольер и Гаудсмита-Саундерсона. Флуктуации ионизационных и радиационных потерь. Каскады частиц. Особенности потерь энергии тяжелых заряженных частиц в веществе. Пик Брэгга	<a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29237">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29237</a>
3.7	Алгоритмы статистического моделирования переноса гамма-излучения.	Взаимодействие фотонов с веществом. Фотоэффект, комптоновское рассеяние, образование электронно-позитронных пар. Спектрально-угловые характеристики вторичных фотонов и электронов (позитронов).	<a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29237">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29237</a>

### 13.2. Темы (разделы) дисциплины и виды занятий

№ п/п	Наименование темы (раздела) дисциплины	Виды занятий (количество часов)				
		Лекции	Практические	Лабораторные	Самостоятельная работа	Всего
1.	Дифференциальные и интегральные характеристики излучений.	4	2	4	12	22
2.	Элементарные акты взаимодействия излучений с веществом.	4	2	4	12	22
3.	Уравнение переноса.	4	2	4	12	22
4.	Аналитические методы решения уравнения переноса.	4	2	4	14	24
5.	Особенности описания переноса нейтронов.	6	2	6	14	28
6.	Алгоритмы статистического моделирования переноса заряженных частиц.	6	4	6	16	32
7.	Алгоритмы статистического моделирования переноса гамма-излучения.	6	2	6	16	30
	Экзамен					36
	Итого:	34	16	34	96	216

#### 14. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины:

Студентам на лекциях необходимо вести подробный конспект и стараться понять материал курса. Для полного понимания материала следует активно использовать консультации. Для самостоятельного изучения разделов курса, рекомендованных преподавателем, необходимо пользоваться основной и дополнительной литературой, интернет-ресурсами.

На практических занятиях необходимо уметь решать задачи и анализировать решение, на устных опросах обучаемый должен уметь продемонстрировать полученные на лекциях и практических занятиях знания, умения и навыки, отвечать на поставленные вопросы, поддерживать дискуссию по существу вопроса.

Методическое обеспечение аудиторной работы: учебно-методические пособия для студентов, учебники и учебные пособия, электронные и Интернет-ресурсы.

Методическое обеспечение самостоятельной работы: учебно-методические пособия по организации самостоятельной работы, контрольные задания и тесты в бумажном и электронном вариантах, тестирующие системы, дистанционные формы общения с преподавателем. Контроль самостоятельной работы реализуется с помощью опросов, тестов, вопросов по темам заданий и т.д.

#### 15. Перечень основной и дополнительной литературы, ресурсов интернет, необходимых для освоения дисциплины

а) основная литература:

№ п/п	Источник
1.	Черняев А.П. Ионизирующие излучения : учебное пособие / А. П. Черняев; Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (МГУ), Физический факультет. — 3-е изд., испр. и доп. — Москва: КДУ, 2014. — 314 с.: ил. — Библиогр.: с. 311-313. — ISBN 978-5-906226-65-5.
2.	А.П. Черняев. Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом. М.: Физматлит, 2004.
3.	Юрасова Т.И. Основы радиационной безопасности: Учебное пособие. Изд.: АТиСО, 2008 г., 156 стр.
4.	Кудряшов Ю.Б. Радиационная биофизика (ионизирующие излучения): учебник. Изд.: ФИЗМАЛИТ, 2004, 443 стр.

б) дополнительная литература:

№ п/п	Источник
5.	Кирсанова З.В. Радиоактивность: открытие, виды радиоактивности, основные закономерности и количественные характеристики: Учебное пособие. Изд.: Издательство МГОУ, 2006 г., С.42
6.	Петров Ю.Ф., Рубин А.Б., Кудряшов Ю.Б. Радиационная биофизика: радиочастотные и микроволновые электромагнитные излучения: Учебник для вузов. Изд.: ФИЗМАЛИТ, 2008 г., 184 стр.

в) информационные электронно-образовательные ресурсы (официальные ресурсы интернет)\*:

№ п/п	Ресурс
7.	<a href="http://www.lib.vsu.ru">www.lib.vsu.ru</a> – ЗНБ ВГУ.
8.	<a href="https://edu.vsu.ru">https://edu.vsu.ru</a> – Электронный университет ВГУ
9.	<a href="https://e.lanbook.com">https://e.lanbook.com</a> – ЭБС «Лань»
10.	<a href="https://www.studentlibrary.ru">https://www.studentlibrary.ru</a> – ЭБС «Консультант студента»
11.	<a href="https://urait.ru">https://urait.ru</a> – Образовательная платформа «ЮРАЙТ»
12.	<a href="https://rucont.ru">https://rucont.ru</a> - Информационно-телекоммуникационная система «Контекстум»

#### 16. Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы

№ п/п	Источник
13.	Физика ядерного реактора. Нейтронно-физический расчет ВВЭР: учебное пособие / А. Я. Благовещенский, А. А. Калютник, М. Н. Конович, В. Н. Митюков. — Санкт-Петербург: СПбГПУ, 2018. — 47 с. — ISBN 978-5-7422-6170-4. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <a href="https://e.lanbook.com/book/112150+">https://e.lanbook.com/book/112150+</a>
14.	Климов, Аполлон Николаевич. Ядерная физика и ядерные реакторы: Учебник для студ. инж.-физ.

## 17. Образовательные технологии, используемые при реализации учебной дисциплины, включая дистанционные образовательные технологии (ДОТ, электронное обучение (ЭО), смешанное обучение):

При проведении занятий по дисциплине используются следующие образовательные технологии:

- активные и интерактивные формы проведения занятий;
- компьютерные технологии при проведении занятий;
- презентационные материалы и технологии при объяснении материала на лекционных и практических занятиях;
- специализированное оборудование при проведении лабораторных работ;
- разбор конкретных ситуаций при постановке целей и задач к разработке прикладных программ, при выборе программного обеспечения по установленным критериям, при разработке программ по предусмотренным алгоритмам и методам.

Для самостоятельной работы используется ЭБС Университетская библиотека online - [www.lib.vsu.ru](http://www.lib.vsu.ru) - ЗНБ ВГУ. Программное обеспечение, применяемое при реализации дисциплины – Microsoft Windows, LibreOffice, CodeBlocks, Adobe Reader, Mozilla FireFox.

Дистанционные образовательные технологии (ДОТ) применяются с использованием образовательного портала «Электронный университет ВГУ».

## 18. Материально-техническое обеспечение дисциплины:

Учебная аудитория для проведения занятий лекционного типа, текущего контроля и промежуточной аттестации

Специализированная мебель

Компьютерный класс, аудитория для групповых и индивидуальных консультаций, помещение для самостоятельной работы

Специализированная мебель, компьютеры с возможностью подключения к сети «Интернет» и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду университета

Microsoft Windows 10, LibreOffice, Adobe Reader

## 19. Оценочные средства для проведения текущей и промежуточной аттестаций

Порядок оценки освоения обучающимися учебного материала определяется содержанием следующих разделов дисциплины:

№ п/п	Наименование раздела дисциплины (модуля)	Компетенция(и)	Индикатор(ы) достижения компетенции	Оценочные средства
1.	Дифференциальные и интегральные характеристики излучений.	ПК-1 ПК-6 ПК-8	ПК-1.3 ПК-6.2 ПК-8.1 ПК-8.3	Практические задачи, тестовые задания (п. 21 ФОС), вопросы к экзамену
2.	Элементарные акты взаимодействия излучений с веществом.			
3.	Уравнение переноса.			
4.	Аналитические методы решения уравнения переноса.			
5.	Особенности описания переноса нейтронов.			
6.	Алгоритмы			



№ п/п	Наименование раздела дисциплины (модуля)	Компетенция(и)	Индикатор(ы) достижения компетенции	Оценочные средства
	статистического моделирования переноса заряженных частиц.			
7.	Алгоритмы статистического моделирования переноса гамма-излучения.			
Промежуточная аттестация форма контроля – экзамен				Пункт 20.2 Перечень вопросов к экзамену

## 20. Типовые оценочные средства и методические материалы, определяющие процедуры оценивания

### 20.1. Текущий контроль успеваемости

Контроль успеваемости по дисциплине осуществляется с помощью следующих оценочных средств:

#### Перечень примерных практических задач:

1. На сколько а.е.м. суммарная масса продуктов деления  $^{235}\text{U}$  тепловыми нейтронами будет меньше массы исходной системы? Каково при этом относительное изменение массы?

2. Сечение деления тепловыми нейтронами на ядро для естественной смеси изотопов урана равно 4,22 барн. Вычислить сечение деления тепловыми нейтронами на ядро  $^{235}\text{U}$ , учитывая, что  $^{238}\text{U}$  тепловыми нейтронами не делится.

3. Определить количество делений и поглощений без деления за 1 с в размножающей среде из урана. Плотность потока тепловых нейтронов  $\Phi_0=1,0 \cdot 10^{10} \text{ (см}^2 \cdot \text{с)}^{-1}$ , а обогащение нуклидом  $^{235}\text{U}$  составляет 5%.

4. Пластика из естественного металлического урана размерами  $1 \times 1 \times 0,1 \text{ см}^3$  облучается в течение 24 часов параллельным потоком тепловых нейтронов, падающих по нормали к поверхности пластики. Плотность потока нейтронов  $\Phi_0=1,0 \cdot 10^{10} \text{ (см}^2 \cdot \text{с)}^{-1}$ . Оценить полную энергию, выделившуюся в результате деления.

5. Какой слой  $^{235}\text{U}$  при падении на него  $N_0$  тепловых нейтронов в секунду дает то же число быстрых нейтронов деления.

6. Наиболее вероятные значения массовых чисел осколков деления  $^{235}\text{U}$  тепловыми нейтронами составляют 95 и 139. Вычислить энергии и скорости каждого из осколков, если их общая кинетическая энергия составляет 165 МэВ.

7. В чём физический смысл коэффициента размножения нейтронов  $k$ ? Во сколько раз увеличится первоначальное количество нейтронов в сотом поколении, если  $k = 1,01$ ?

8. Найти число нейтронов, возникающих в секунду в реакторе с тепловой мощностью  $P = 100 \text{ Вт}$ , если среднее число вторичных нейтронов на каждый акт деления  $\nu = 2,5$ . Считать, что при каждом делении освобождается энергия  $Q = 200 \text{ МэВ}$ .

9. Оценить средний пробег нейтрона в алюминии до первого взаимодействия.

10. Нейтрон упруго рассеялся на первоначально покоившемся ядре  $^9\text{Be}$ . Найти долю кинетической энергии, теряемой нейтроном при рассеянии на угол  $J$ , если  $J$  равен  $30^\circ$ ,  $90^\circ$  и  $150^\circ$ .

Описание критериев и шкалы оценивания компетенций (результатов обучения) при аттестации

Критерии оценивания компетенций	Шкала оценок
Обучающийся демонстрирует полное соответствие знаний, умений, навыков приведенным в таблицах показателям, свободно оперирует приобретенными знаниями, умениями, применяет их при решении практических задач	Отлично
Обучающийся демонстрирует соответствие знаний, умений, навыков приведенным в таблицах показателям, но допускает незначительные ошибки,	Хорошо

неточности, испытывает затруднения при решении практических задач	
Обучающийся демонстрирует неполное соответствие знаний, умений, навыков приведенным в таблицах показателям, допускает значительные ошибки при решении практических задач	Удовлетворительно
Обучающийся демонстрирует явное несоответствие знаний, умений, навыков приведенным в таблицах показателям	Неудовлетворительно

## 20.2. Промежуточная аттестация

Промежуточная аттестация по дисциплине осуществляется с помощью следующих оценочных средств:

### Перечень вопросов к экзамену:

1. Активность радионуклида.
2. Постоянная распада и период полураспада.
3. Поток и токовые характеристики поля излучений и единицы их измерения.
4. Понятие элементарной сферы.
5. Флюенс частиц.
6. Плотность тока частиц вдоль заданного направления.
7. Дважды дифференциальные по углам и энергии сечения рассеяния.
8. Макроскопическое сечение взаимодействия (линейный коэффициент ослабления), длина свободного пробега, слой половинного ослабления.
9. Взаимодействие электронов и других заряженных частиц с веществом.
10. Ионизационные и радиационные потери, формула Бете-Гайтлера.
11. Взаимодействие фотонов с веществом.
12. Фотоэффект, комптоновское рассеяние, образование электронно-позитронных пар. Взаимодействие нейтронов с веществом.
13. Классификация нейтронов по энергиям.
14. Стадии протекания ядерных реакций с участием нейтронов.
15. Кинематика рассеяния нейтронов.
16. Макроскопические сечения поглощения и деления.
17. Интегро-дифференциальная форма уравнения переноса (кинетическое уравнение Больцмана). Граничные условия.
18. Уравнение переноса для плоской, цилиндрической и сферической геометрии. Свойства уравнения переноса.
19. Интегральная форма уравнения переноса (уравнение Пайерлса).
20. Элементарная теория диффузии.  $N$   $P$  - разложение. Транспортное сечение и сечение поглощения.
21. Коэффициент и длина диффузии.
22. Закон Фика. Функция влияния точечного источника.
23. Сферический и цилиндрический поверхностные источники.
24. Пределы применимости диффузной теории.
25. Теория замедления. Уравнение для плотности столкновения и его решение.
26. Приближение непрерывного замедления. Летаргия, плотность замедления и возраст.
27. Теория возраста.
28. Уравнение возраста.
29. Условие применимости возрастной теории.
30. Метод последовательных столкновений.
31. Представление плотности полного потока частиц в методе последовательных столкновений.
32. Плотности потоков одно- и двукратно рассеянных частиц в односкоростном приближении.
33. Метод «укрупненных соударений».
34. Многократное кулоновское рассеяние.
35. Распределение Мольера и Гаудсмита-Саундерсона.
36. Флуктуации ионизационных и радиационных потерь.
37. Каскады частиц.
38. Особенности потерь энергии тяжелых заряженных частиц в веществе. Пик Брэгга

39. Фотоэффект, комптоновское рассеяние, образование электронно-позитронных пар.  
40. Спектрально-угловые характеристики вторичных фотонов и электронов (позитронов).

Промежуточная аттестация проводится в соответствии с Положением о промежуточной аттестации обучающихся по программам высшего образования.

Контрольно-измерительные материалы промежуточной аттестации включают в себя теоретические вопросы, позволяющие оценить уровень полученных знаний и/или практическое(ие) задание(я), позволяющее(ие) оценить степень сформированности умений и(или) навыков, и(или) опыт деятельности.

При оценивании используются количественные или качественные шкалы оценок. Критерии оценивания приведены ниже.

Описание критериев и шкалы оценивания компетенций (результатов обучения) при аттестации

Критерии оценивания компетенций	Шкала оценок
Обучающийся демонстрирует полное соответствие знаний, умений, навыков приведенным в таблицах показателям, свободно оперирует приобретенными знаниями, умениями, применяет их при решении практических задач	Отлично
Обучающийся демонстрирует соответствие знаний, умений, навыков приведенным в таблицах показателям, но допускает незначительные ошибки, неточности, испытывает затруднения при решении практических задач	Хорошо
Обучающийся демонстрирует неполное соответствие знаний, умений, навыков приведенным в таблицах показателям, допускает значительные ошибки при решении практических задач	Удовлетворительно
Обучающийся демонстрирует явное несоответствие знаний, умений, навыков приведенным в таблицах показателям	Неудовлетворительно

## Пример контрольно-измерительного материала (КИМ)

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой  
ядерной физики  
\_\_\_\_\_ Титова Л.В.

Направление подготовки:

14.05.02 Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг.

Дисциплина: Б1.В.04 Теория переноса излучений

Вид контроля: Экзамен

### Контрольно-измерительный материал №1

1.Макроскопическое сечение взаимодействия (линейный коэффициент ослабления), длина свободного пробега, слой половинного ослабления.

2.Закон Фика. Функция влияния точечного источника

Преподаватель \_\_\_\_\_ . \_\_\_\_\_  
подпись расшифровка подписи

### 21. Фонд оценочных средств, рекомендуемых к использования в ходе проверки остаточных знаний (оценке достижения результатов освоения дисциплины)"

#### Тесты по теории переноса

1. Основным эффектом, определяющим распространение гамма квантов в свинце при энергии  $<100$  кэВ является
  - a. Комptonовское рассеяние
  - b. Упругое рассеяние
  - c. Фотопоглощение
  - d. Рождение пар
2. Замедление нейтронов до тепловых энергий может происходить за счет ... взаимодействия с ядрами
  - a. Упругого потенциального
  - b. Неупругого
  - c. Резонансного
  - d. Всех вышеперечисленных
3. Основным эффектом, определяющим распространение гамма квантов в воде при энергии  $>1$  МэВ является
  - e. Комptonовское рассеяние
  - f. Упругое рассеяние
  - g. Фотопоглощение
  - h. Рождение пар
4. Упругое рассеяние нейтронов на ядрах вещества является в общем случае
  - a. Симметричным, не зависящим от атомной массы

- b. Несимметричным, не зависящим от атомной массы
- c. Симметричным, но зависящим от атомной массы
- d. Несимметричным, зависящим от атомной массы
5. Какие эффекты определяют распространение легких заряженных частиц (электронов, позитронов и т.д.) в веществе?
- a. Рассеяние в поле атомного ядра и электронов оболочки атома
- b. Потери на возбуждение атомов среды.
- c. Потери на ионизацию атомов среды.
- d. Множественное кулоновское рассеяние и ионизационные потери.
6. Как зависит сечение фотопоглощения от атомного номера  $Z$ ?
- a. Пропорционально  $Z$ .
- b. Пропорционально  $Z^{4,5}$ .
- c. Пропорционально  $Z^2$ .
- d. Пропорционально  $Z^3$ .
7. Как связаны величины длины диффузии нейтронов  $L$  и среднего смещения нейтрона от точки рождения  $R$ ?
- a.  $L=R$
- b.  $L=0.5R$
- c.  $L^2=\frac{1}{6}R^2$
- d.  $L^2=\frac{1}{3}R^2$
8. Как связаны величины квадрата длины замедления (возраста) нейтронов  $\tau$  и среднего смещения нейтрона от точки рождения  $R$ ?
- a.  $\tau=R$
- b.  $\tau=\frac{1}{6}R^2$
- c.  $\tau=0.5R$
- d.  $\tau=\frac{1}{3}R^2$
9. Плотность тока нейтронов – это
- a. Сумма числа нейтронов, проходящих через поверхность единичной площади, в двух противоположных направлениях, перпендикулярных поверхности, за единицу времени
- b. Разность числа нейтронов, проходящих через поверхность единичной площади, в двух противоположных направлениях за единицу времени
- c. Сумма числа нейтронов, проходящих через поверхность единичной площади, в двух противоположных направлениях за единицу времени
- d. Разность числа нейтронов, проходящих через поверхность единичной площади, в двух противоположных направлениях, перпендикулярных поверхности, за единицу времени
10. Плотность потока частиц определяет
- a. Количество частиц, проходящих через поверхность единичной площади за единицу времени.
- b. Количество частиц, проходящих через поверхность единичной площади за единицу времени в определенном направлении.

- c. Количество частиц, проходящих через поверхность единичной площади за единицу времени и имеющих определенную энергию.
  - d. Количество частиц, проходящих через поверхность единичной площади.
11. Какой формулой описываются средние потери энергии заряженной частицы на единице длины пути в веществе?
- a. Формулой Резерфорда
  - b. Формулой Комптона
  - c. Формулой Бете-Блоха
  - d. Формулой Мольера
12. Макроскопическое сечение взаимодействия частиц с веществом – это
- a. Полное сечение взаимодействия частицы с ядром
  - b. Сечение взаимодействия со всеми ядрами в веществе.
  - c. Среднее количество взаимодействий с атомными ядрами на единице длины пути в веществе.
  - d. Среднее количество взаимодействий с атомными ядрами за единицу времени.
13. Что называют пиком Брэгга при распространении тяжелых заряженных частиц в веществе?
- a. Форму угловой зависимости при многократном упругом рассеянии.
  - b. Форму угловой зависимости при многократном неупругом рассеянии.
  - c. Резкий рост радиационных потерь
  - d. Резкое возрастание ионизационных потерь в конце пробега частиц.
14. Что содержит наиболее полную информацию о стационарном поле излучения?
- a. Плотность потока частиц
  - b. Угловая зависимость плотности потока частиц
  - c. Энергетическая зависимость плотности потока частиц.
  - d. Энергетически-угловая плотность потока частиц
15. Почему средний угол отклонения от первоначального направления для тяжелых заряженных частиц много меньше, чем у легких, при одинаковых пробегах?
- a. Легкие заряженные частицы сильнее взаимодействуют с атомами.
  - b. Тяжелые заряженные частицы сильнее взаимодействуют с атомами.
  - c. Отклонение тяжелых заряженных частиц мало в силу законов сохранения импульса и энергии.
  - d. Отклонение легких заряженных частиц велико в силу большей вероятности ионизации.

Открытые задания, повышенный уровень сложности

1. Направляющий вектор  $\Omega$  обычно выражают в сферической системе координат. Считая эти координаты заданными, выразить  $\Omega$  в декартовой системе и цилиндрической системах координат. Ответ  $\Omega = \sin\theta \cos\psi \cdot i + \sin\theta \sin\psi \cdot j + \cos\theta \cdot k$ .
2. Пусть в заданной точке пространства  $r$  угловая плотность потока частиц изотропна, т.е. описывается выражением  $\phi(r, \Omega) = F(r) / 4\pi$ . Определить: а) плотность потока в положительную полусферу направлений (вперед); б) проекцию угловой плотности тока на направление, задаваемое единичным вектором  $k$ ; в) интегральную плотность тока. Ответ а)  $\phi(r) = F(r)/2$ ; б)  $(\int_0^\pi \int_0^{2\pi} \cos\theta \sin\theta d\theta d\psi) / 4\pi$ ; в)  $\int_0^\pi \int_0^{2\pi} F(r) \cos\theta \sin\theta d\theta d\psi$ .
3. Найти угловую плотность потока частиц в произвольной точке над плоским изотропным источником, испускающим  $v$  част./ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ . Ответ:  $v/(4\pi r^2)$ ,  $\mu > 0$ ;  $\mu < 0$

4. Изотропный поверхностный источник, испускающий  $\nu$  част./( $\text{см}^2 \cdot \text{с}$ ), равномерно покрывает поверхность полусферы радиусом  $R$ . Предполагая отсутствие поглощения внутри сферы, найти плотности потока и тока частиц в центре сферы. Ответ  $\phi = \nu/2$ ;  $J = \nu/4$ .
5. Точечный изотропный источник  $\gamma$ -излучения, испускающий  $3,7 \cdot 10^{10}$  частиц/с, находится в непоглощающей и нерассеивающей среде на расстоянии 100 см от облучаемого образца из алюминия объемом 0,1  $\text{см}^3$ . Определить сечение некогерентного рассеяния фотонов на электронах, если в единицу времени в образце рассеивается  $1,5 \cdot 10^4$  фотонов. Ответ  $0,65 \cdot 10^{-24} \text{см}^2$ .
6. Определить максимально возможную энергию фотонов после комптоновского рассеяния на угол  $\theta = 180^\circ$ . Ответ  $E_{\text{max}} = 0,255 \text{ МэВ}$ .
7. Рассчитать полное микроскопическое сечение взаимодействия гамма-излучения для этилового спирта  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ , имеющего плотность 0,79 г/см<sup>3</sup>, для энергии 0,08 МэВ. Ответ  $0,139 \text{ см}^{-1}$
8. Вычислить степень анизотропии углового распределения фотонов при комптоновском рассеянии для начальных энергий, равных 0,01; 0,1 и 10,0 МэВ, понимая под этим отношение вероятностей рассеяния на углы  $\theta$ , равные  $0^\circ$  и  $180^\circ$ . Ответ 1,24; 2,02; 83,0.
9. Найти связь между углами упругого рассеяния нейтронов на ядре водорода в лабораторной системе координат  $\theta_s$  и в системе центра инерции  $\theta_c$ . Ответ  $\cos \theta_s = \cos \theta_c/2$ .
10. Пусть нейтрон испытывает неупругое рассеяние на первом уровне возбуждения  $^{56}\text{Fe}$  ( $Q = -0,845 \text{ МэВ}$ ). Определить: а) при какой минимальной начальной энергии возможно это рассеяние; б) при какой минимальной начальной энергии возможно рассеяние на углы  $\theta_s$ , равные  $45^\circ$  и  $90^\circ$ . Ответ а) 0,860 МэВ; б) 0,8602 МэВ; 0,8603 МэВ.
11. Покажите, что средние потери энергии при изотропном упругом рассеянии на ядре массой  $A$  равны  $\Delta E = 2E_0 A / (A + 1)^2$
12. Получить решение уравнения элементарной теории диффузии в бесконечной однородной среде для точечного и плоского изотропных источников единичной мощности.  
 Ответ  $\varphi(r) = \frac{1}{4\pi B} \frac{\exp(-\frac{r}{L})}{r}$ ,  $\varphi(z) = \frac{1}{2\Sigma_0 L} \exp(-|z|/L)$ .
13. В приближении элементарной теории диффузии найти критический размер шара из  $^{235}\text{U}$ . Считать, что нейтроны, рождающиеся при делении, имеют одну энергию, которая не изменяется в процессе диффузии. При расчетах принять  $\Sigma_a = 0,357 \text{ см}^{-1}$ ;  $\Sigma_s = 0,393 \text{ см}^{-1}$ ;  $\Sigma_f = 0,193 \text{ см}^{-1}$ ;  $\nu = 2,46$ . Ответ 6,52 см;
14. Получить решение уравнения возраста для плоского моноэнергетического источника единичной поверхностной мощности в бесконечной однородной среде. Ответ  

$$q(z, \tau) = \frac{1}{\sqrt{4\pi\tau}} \exp\left(-\frac{z^2}{4\tau}\right)$$
15. Коллимированный пучок фотонов нормально падает на полубесконечную среду, в которой излучение испытывает изотропное рассеяние без изменения энергии. В приближении однократного рассеяния определить зависимость обратного выхода излучения от расстояния  $r$  до точки падения излучения на среду при условии, что  $r \gg 1/\mu$ . Ответ  $f(r) \exp(-\Sigma r)$ .

### Критерии и шкалы оценивания:

Для оценивания выполнения заданий используется балльная шкала:

#### 1) закрытые задания (тестовые, средний уровень сложности):

- 1 балл – указан верный ответ;
- 0 баллов – указан неверный ответ, в том числе частично.

#### 2) открытые задания (повышенный уровень сложности):

- 5 баллов – указан верный ответ;
- 2 балла – указан неверный ответ, но ход решения верный;
- 0 баллов – указан неверный ответ.

