


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

**УТВЕРЖДАЮ**

Заведующий кафедрой  
теоретической физики

*наименование кафедры, отвечающей за реализацию дисциплины*

 (Фролов М.В.)  
*подпись, расшифровка подписи*

16.06.2022 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ  
Б1.В.12 Основы электродинамики и квантовой механики**

**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:**

0802 – теоретической физики

**6. Составители программы:**

к.ф.м.н., доцент, Флегель Александр Валерьевич

**7. Рекомендована:**

Научно – методическим советом физического факультета, протокол №6 от 14.06.2022 г.

**8. Учебный год:** 2024 - 2025

**Семестр(ы):** 5-6

### 9. Цели и задачи учебной дисциплины:

Целью курса является формирование представлений об электродинамике и квантовой теории и их методах.

Задачи дисциплины: изучить основные положения и уравнения электродинамики и квантовой механики, освоить математический аппарат электродинамики и квантовой механики, изучить основные методы и подходы решения задач электродинамики и квантовой механики, приобрести навыки решения типовых электродинамических и квантовомеханических.

**10. Место учебной дисциплины в структуре ООП:** Входит в модуль "Вариативная часть" Б1.В. Студенты должны обладать знаниями дисциплин «Высшая математика», «Механика, молекулярная физика и термодинамика», «Электростатика, электромагнетизм, колебания и волны»

**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	<p>знать: основные положения и методы классической электродинамики и нерелятивистской квантовой механики;</p> <p>уметь: использовать в профессиональной деятельности знания о свойствах микро- и макросистем, а также методах их исследования, применять полученные знания для освоения профильных дисциплин и решения профессиональных задач;</p> <p>Владеть: современным аппаратом теоретической и математической физики, необходимым для решения задач классической электродинамики и нерелятивистской квантовой механики</p>
ПК-6	Способность анализировать нейтронно-физические, технологические процессы и алгоритмы контроля, диагностики, управления и защиты в стационарных и нестационарных режимах работы, обеспечивать оптимальные режимы работы ядерного реактора, тепломеханического оборудования и энергоблока АС	ПК-6.4	Знает основы обеспечения оптимальных режимов работы ядерного реактора, тепломеханического оборудования и энергоблока АС	

**12. Объем дисциплины в зачетных единицах/час.** (в соответствии с учебным планом) —6 / 216.

**Форма промежуточной аттестации**(зачет/экзамен) зачет, зачет.

### 13. Трудоемкость по видам учебной работы

Вид учебной работы	Трудоемкость		
	Всего	По семестрам	
		5	6
Аудиторные занятия	98	50	48
в том числе:	лекции	66	32
	практические	32	16
Самостоятельная работа	118	58	60
в том числе: курсовая работа (проект)			
Форма промежуточной аттестации		Зачет	Зачет
Итого:	216	108	108

#### 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	Основные уравнения электромагнитного поля в вакууме	Законы электромагнетизма как результат обобщения опытных данных. Система уравнений Максвелла для электромагнитного поля в вакууме. Энергия и импульс электромагнитного поля.	<a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256</a>
1.2	Постоянное электрическое поле	Основные уравнения постоянного электрического поля. Поле на больших расстояниях от системы зарядов. Дипольный и квадрупольный моменты. Система зарядов в квазиоднородном внешнем поле.	<a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256</a>
1.3	Постоянное магнитное поле	Уравнения постоянного магнитного поля. Закон Био–Савара–Лапласа. Магнитный момент. Магнитная энергия постоянных токов. Коэффициенты индуктивности. Токи в квазиоднородном магнитном поле. Силы в постоянном магнитном поле.	<a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256</a>
1.4	Излучение и рассеяние электромагнитных волн	Уравнения для электромагнитных потенциалов. Электромагнитные волны. Плоские монохроматические волны. Поляризация волны. Запоздывающие потенциалы. Общая теория излучения. Дипольное излучение. Магнитно-дипольное и квадрупольное излучения. Торможение излучением. Спектральное разложение излучения. Рассеяние электромагнитных волн.	<a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256</a>
1.5	Система уравнений Максвелла в средах	Уравнения электромагнитного поля в поляризующихся и намагничивающихся средах.	<a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256</a>
1.6	Постоянные электрическое и магнитное поля в средах. Постоянный ток в средах	Электростатика проводников. Электростатика диэлектриков. Постоянный ток в проводящих средах. Постоянное магнитное поле в средах.	<a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256</a>
1.7	Квазистационарные токи и поля	Квазистационарное приближение. Система линейных проводников. Скин-эффект.	<a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256</a>
1.8	Электромагнитные волны в средах	Электромагнитные волны в диэлектриках в отсутствие дисперсии. Дисперсия диэлектрической проницаемости. Отражение и преломление. Распространение волн в неоднородной среде.	<a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256</a>
1.9	Основные понятия квантовой механики	Вероятностное описание состояний физических систем. Волновая функция. Физические величины в квантовой механике. Операторы важнейших физических величин. Соотношение неопределённости. Совместная	<a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256</a>

		измеримость физических величин. Уравнение Шредингера. Уравнение непрерывности. Изменение средних значений физических величин со временем. Интегралы движения. Стационарные состояния. Элементы теории представлений.	
1.10	Простейшие применения квантовой механики	Частица в прямоугольной потенциальной яме. Линейный гармонический осциллятор. Прохождение и отражение частиц для одномерного движения. Движение частицы в постоянном электрическом поле.	<a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256</a>
1.11	Движение частицы в поле центральных сил	Движение частицы в сферически-симметричном поле. Интегралы движения в центральном поле. Оператор углового момента. Свободная частица с определенным значением орбитального момента. Движение частицы в кулоновском поле.	<a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256</a>
1.12	Приближенные методы квантовой механики	Квазиклассическое решение 1-мерного уравнения Шредингера (метод Вентцеля—Крамерса—Бриллюэна). Условия применимости квазиклассического приближения. Правила сопряжения. Правило квантования Бора—Зоммерфельда. Стационарная теория возмущений для изолированного уровня. Стационарная теория возмущений для вырожденных состояний. Вариационный принцип в квантовой теории. Вариационный метод Ритца.	<a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256</a>
1.13	Теория квантовых переходов под влиянием внешнего возмущения	Вынужденное поглощение и излучение света. Нестационарная теория возмущений: квантовые переходы, золотое правило Ферми. Правила отбора для дипольного излучения.	<a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256</a>
1.14	Элементы квантовой теории рассеяния	Квантовая теория рассеяния: интегральное уравнение на волновую функцию, амплитуда рассеяния. Квантовая теория рассеяния: борновское приближение для амплитуды рассеяния. Условия применимости борновского приближения.	<a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256</a>
<b>2. Практические занятия</b>			
2.1	Основные уравнения электромагнитного поля в вакууме	Уравнения Максвелла. Стационарные уравнения Максвелла. Интегральные уравнения.	<a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256</a>
2.2	Постоянное электрическое поле	Система уравнений Максвелла для стационарных электрических полей. Теорема Гаусса. Уравнение Пуассона для стационарного потенциала.	<a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256</a>
2.3	Постоянное магнитное поле	Закон Ампера. Уравнение Пуассона векторного потенциала. Закон Био-Савара-Лапласа.	<a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256</a>
2.4	Излучение и рассеяние электромагнитных волн	Волновое уравнение. Плоские монохроматические волны. Дипольное излучение. Магнитно-дипольное и квадрупольное излучения. Спектральное разложение излучения.	<a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256</a>
2.5	Система уравнений Максвелла в средах	Уравнения Максвелла в средах. Линейная и нелинейная среда.	<a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256</a>
2.6	Постоянные электрическое и магнитное поля в средах. Постоянный ток в средах	Диэлектрики в постоянном электрическом поле. Пара- и диамагнетики в постоянном магнитном поле.	<a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256</a>
2.7	Квазистационарные токи и поля	Скин-эффект	<a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256</a>
2.8	Электромагнитные волны в средах	Генерация гармоник, самофокусировка.	<a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256</a>

2.9	Основные понятия квантовой механики	Основные понятия теории линейных операторов. Собственные функции, собственные значения, средние. Представления операторов и волновых функций. Стационарные состояния дискретного и непрерывного спектра.	<a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256</a>
2.10	Простейшие применения квантовой механики	Частица в прямоугольной потенциальной яме. Линейный гармонический осциллятор. Прохождение и отражение частиц для одномерного движения.	<a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256</a>
2.11	Движение частицы в поле центральных сил	Состояния дискретного спектра в центральных полях. Состояния с малой энергией связи.	<a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256</a>
2.12	Приближенные методы квантовой механики	Квантование энергетического спектра. Квазиклассические волновые функции, вероятности и средние. Прохождение через потенциальные барьеры. Стационарная теория возмущений (дискретный спектр). Вариационный метод.	<a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256</a>
2.13	Теория квантовых переходов под влиянием внешнего возмущения	Квантовые переходы, золотое правило Ферми. Правила отбора для дипольного излучения.	<a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256</a>
2.14	Элементы квантовой теории рассеяния	Борновское приближение для амплитуды рассеяния.	<a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256</a>

\* заполняется, если отдельные разделы дисциплины изучаются с помощью онлайн-курса. В колонке Примечание необходимо указать название онлайн-курса или ЭУМК. В других случаях в ячейки ставятся прочерки.

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

№ п/п	Наименование темы (раздела) дисциплины	Виды занятий (часов)				
		Лекции	Практические	Лабораторные	Самостоятельная работа	Всего
1	Основные уравнения электромагнитного поля в вакууме	4	2		4	10
2	Постоянное электрическое поле	4	3		10	17
3	Постоянное магнитное поле	4	3		10	17
4	Излучение и рассеяние электромагнитных волн	6	3		10	19
5	Система уравнений Максвелла в средах	4	1		8	13
6	Постоянные электрическое и магнитное поля в средах. Постоянный ток в средах	4	2		8	14
7	Квазистационарные токи и поля	4	1		4	9
8	Электромагнитные волны в средах	4	1		4	9
9	Основные понятия квантовой механики	8	4		10	22
10	Простейшие применения квантовой механики	4	4		12	20
11	Движение частицы в поле центральных сил	4	2		8	16
12	Приближенные методы квантовой механики	6	3		12	19
13	Теория квантовых переходов под влиянием внешнего возмущения	4	1		8	13

14	Элементы квантовой теории рассеяния	6	2		10	18
	Итого:	66	32		118	216

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

(рекомендации обучающимся по освоению дисциплины: указание наиболее сложных разделов, работа с конспектами лекций, презентационным материалом, рекомендации по выполнению курсовой работы, по организации самостоятельной работы по дисциплине и др.)

Необходимо после каждой лекции по ее теме разбирать и осваивать лекционный материал, для его лучшего понимания читать рекомендованную основную и дополнительную литературу, готовиться к практическому занятию, разбирая соответствующий теоретический материал, систематически выполнять домашние задания, не пропускать текущие тестирования по пройденному теоретическому и практическому материалу.

#### 15. Перечень основной и дополнительной литературы, ресурсов интернет, необходимых для освоения дисциплины (список литературы оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ и используется общая сквозная нумерация для всех видов источников)

а) основная литература:

№ п/п	Источник
1	Алексеев А.И. Сборник задач по классической электродинамике / А.И. Алексеев. – СПб.: Лань, 2008. – 320 с. // «Университетская библиотека online» : электронно-библиотечная система. – URL : « <a href="http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&amp;pl1_id=100">http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&amp;pl1_id=100</a> »
2	Давыдов А.С. Квантовая механика : учебное пособие – 3 изд. / А.С. Давыдов .— . СПб: БХВ-Петербург., 2014 .— 704 с.
3	Квантовая теория [Электронный ресурс] : курс лекций : Ч. 1 / [И.В. Копытин, А.С. Корнев, Н.Л. Манаков] . — Воронеж : Издательский дом ВГУ, 2015 .// «Университетская библиотека online» : электронно-библиотечная система. – URL : <a href="http://www.lib.vsu.ru/elib/texts/method/vsu/m16-09.pdf">http://www.lib.vsu.ru/elib/texts/method/vsu/m16-09.pdf</a>
4	Квантовая теория [Электронный ресурс] : курс лекций : Ч. 2 / И.В. Копытин [и др.] . — Воронеж : Издательский дом ВГУ, 2017 .// «Университетская библиотека online» : электронно-библиотечная система. – URL : <a href="http://www.lib.vsu.ru/elib/texts/method/vsu/m17-102.pdf">http://www.lib.vsu.ru/elib/texts/method/vsu/m17-102.pdf</a>

б) дополнительная литература:

№ п/п	Источник
5	Алтунин К.К. Электродинамика, специальная теория относительности и электродинамика сплошных сред / К.К. Алтунин. – М.: Директ-Медиа, 2014. – 109 с. // «Университетская библиотека online» : электронно-библиотечная система. – URL : « <a href="https://biblioclub.lib.vsu.ru/index.php?page=book&amp;id=240549&amp;sr=1">https://biblioclub.lib.vsu.ru/index.php?page=book&amp;id=240549&amp;sr=1</a> »
6	Бредов М.М. Классическая электродинамика / М.М. Бредов, В.В. Румянцев, И.Н. Топтыгин. – СПб.: Лань, 2003. – 398 с. // «Университетская библиотека online» : электронно-библиотечная система. – URL : « <a href="http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&amp;pl1_id=606">http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&amp;pl1_id=606</a> ».
7	Ландау Л.Д. Теория поля / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Физматлит, 2003. – 530 с.
8	Ландау Л.Д. Электродинамика сплошных сред / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Физматлит, 2003. – 651 с.
9	Батыгин В.В. Сборник задач по электродинамике и специальной теории относительности [Электронный ресурс] : учеб. пособие / В. В. Батыгин, И. Н. Топтыгин .— Москва : Лань, 2010 .— 480 с. // «Университетская библиотека online» : электронно-библиотечная система. – URL : « <a href="http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&amp;pl1_id=544">http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&amp;pl1_id=544</a> »
10	Терлецкий Я.П. Электродинамика / Я.П. Терлецкий, Ю.П. Рыбаков. – М.: Высш. шк., 1990. – 352 с.

11	<i>Мармо С.И. Лекции по электродинамике : Электромагнитные явления в вакууме. (учебное пособие) / С.И. Мармо, А.В. Флегель, М.В. Фролов. - Воронеж : Издательский дом ВГУ, 2020. – 106 с.</i>
12	<i>Мармо С.И. Лекции по электродинамике : Специальная теория относительности и электромагнитные явления. Электромагнитные явления в веществе. (учебное пособие) / С.И. Мармо, А.В. Флегель, М.В. Фролов. - Воронеж : Издательский дом ВГУ, 2020. – 120 с.</i>
13	<i>Галицкий В. М. Задачи по квантовой механике : учебное пособие для студ. физ. специальностей вузов : в 2 ч. / В.М. Галицкий, Б.М. Карнаков, В.И. Коган. — М. : Едиториал УРСС, 2001.</i>
14	<i>Блохинцев Д.И. Основы квантовой механики : Учеб. пособие для вузов] / Д. И. Блохинцев — 7-е изд., доп. — СПб. : Лань, 2004. — 664 с,</i>
15	<i>Ландау Л.Д. Квантовая механика: Нерелятивистская теория (5-е изд.) / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. — М. : Физматлит, 2001 – 803 с.</i>
16	<i>Балашов В.В. Курс квантовой механики/ Балашов В.В., Долинов В.К. – Ижевск: РХД, 2001 – 336 с.</i>
17	<i>Базь А.И. Рассеяние, реакции и распады в нерелятивистской квантовой механике / А.И. Базь, Я.Б. Зельдович, А.М. Переломов. — Изд. 2-е, испр. и доп. — М. : Наука, 1971. — 544 с.</i>

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

№ п/п	Ресурс
18	<a href="http://www.lib.vsu.ru/">http://www.lib.vsu.ru/</a>
19	<a href="https://biblioclub.lib.vsu.ru/">https://biblioclub.lib.vsu.ru/</a>
20	<a href="https://lanbook.lib.vsu.ru/">https://lanbook.lib.vsu.ru/</a>

\* Вначале указываются ЭБС, с которыми имеются договора у ВГУ, затем открытые электронно-образовательные ресурсы, онлайн-курсы, ЭУМК

## **16. Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы (учебно-методические рекомендации, пособия, задачки, методические указания по выполнению практических (контрольных), курсовых работ и др.)**

№ п/п	Источник
1	<i>Мармо С.И. Задачи по электродинамике (учебное пособие) / С.И. Мармо, А.В. Флегель, М.В. Фролов. - Воронеж : Издательский дом ВГУ, 2020. – 149 с.</i>
2	<i>Копытин И.В. Задачи по квантовой механике/ И.В. Копытин, А.С. Корнев— Воронеж, 2004 (в трех частях).</i>

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

## **18. Материально-техническое обеспечение дисциплины:**

Учебная аудитория

Специализированная мебель

Компьютерный класс 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: <https://get.adobe.com/ru/reader/legal/licenses>

## **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	Разделы 1.1-1.8, 2.1-2.8	ПК-1	ПК-1.3	Задачи, выносимые на контрольную работу 1
2	Разделы 1.9-1.14, 2.9-2.14	ПК-6	ПК-6.4	Задачи, выносимые на контрольную работу 2
Промежуточная аттестация форма контроля – зачет				Список вопросов к зачету 1
Промежуточная аттестация форма контроля – зачет				Список вопросов к зачету 2

## 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: контрольная работа 1, 2.

#### Пример задач, выносимых на контрольную работу 1

1. Пространство заполнено зарядом, плотность которого меняется по закону  $\rho = \rho(r)$  (конкретный вид  $\rho(r)$  будет задан). Найти напряженность поля  $\mathbf{E}$  как функцию  $r$ .
2. Электрический заряд  $q$  равномерно распределен по тонкому кольцу радиусом  $a$ . В центре кольца помещен заряд  $-q$ . Найти а) потенциал и напряженность поля, создаваемого системой на оси кольца; б) потенциал на оси кольца на большом расстоянии от системы (каким мультипольным моментом определяется его величина?).
3. Окружность радиусом  $R$  заряжена с линейной плотностью  $\lambda = \lambda_0 \sin \alpha$  (угол  $\alpha$  отсчитывается от одного из радиусов окружности). Найти дипольный момент системы.
4. На оси  $Oz$  в точках с координатами  $-a$  и  $+a$  расположены заряды  $+e$ , а в начале координат - заряд  $-2e$ . Найти тензор квадрупольного момента системы. Записать потенциал поля на большом расстоянии от зарядов как функцию угла  $\theta$ .
5. Внутри бесконечного цилиндра радиусом  $R$  параллельно оси течет ток с объемной плотностью  $\mathbf{j} = \mathbf{j}(r)$  ( $r$  - расстояние до оси цилиндра). Найти индукцию магнитного поля внутри и снаружи цилиндра.
6. Прямой провод имеет виток радиусом  $R$ . По проводу течет ток  $J$ . Определить индукцию магнитного поля в центре витка и на его оси на расстоянии  $h$  от центра.
7. Равномерно заряженный плоский диск вращается вокруг своей оси с угловой скоростью  $\omega$ . Радиус диска -  $a$ , полный заряд -  $Q$ . Найти индукцию магнитного поля, создаваемого диском на расстояниях  $r \gg a$ .
8. Заряд  $Q$  равномерно распределен по объему шара радиуса  $R$ . Одна половина шара вращается вокруг своей оси симметрии с постоянной угловой скоростью  $\omega_1$  а другая вращается с постоянной угловой скоростью  $\omega_2$  в противоположном направлении. Найти магнитную индукцию  $\mathbf{B}$  в центре шара.
9. Частица с массой  $m$  и зарядом  $e$  движется в однородном магнитном поле  $\mathbf{B}$  по окружности радиусом  $R$ . Найти энергию, теряемую на дипольное излучение за один оборот.
10. Прямоугольная рамка с постоянным линейным током  $J$  вращается вокруг своей диагонали



с постоянной угловой скоростью  $\omega$ . Площадь рамки равна  $S$ , а ее линейные размеры малы по сравнению с длиной излучаемой волны. Найти интенсивность  $dI$  излучения в телесный угол  $d\Omega$  в среднем по времени за период вращения рамки.

11. Электрон влетает в плоский конденсатор и через некоторое время покидает его в той же точке. Напряженность  $E$  поля в конденсаторе однородна и постоянна, скорость электрона при влете равна  $v$ . Найти спектральное распределение полной энергии  $d\mathcal{E}_\omega$  дипольного излучения электрона.

### Пример задач, выносимых на контрольную работу 2

1. Определить какие из нижеперечисленных операторов являются линейными эрмитовыми операторами:
  - (a) оператор сдвига:  $T\varphi(x) = \varphi(x + a)$ ;
  - (b) оператор отражения:  $I\varphi(x) = \varphi(-x)$ ;
  - (c) оператор сопряжения:  $S\varphi(x) = \varphi^*(x)$ ;
  - (d) оператор дифференцирования:  $D\varphi(x) = d\varphi(x)/dx$
2. Найти собственные функции оператора  $f = \alpha x + \beta p$ . Найти нормировку этих собственных функций.
3. Записать волновую функцию  $\varphi(x) = C|x|\exp(-\alpha|x|)$  и оператор сдвига  $T\varphi(x) = \varphi(x + a)$  в импульсном представлении.
4. Найти связанные состояния в потенциале  $U(x) = -\alpha(\delta(x + a) + \delta(x - a))$ ,  $\alpha > 0$ .
5. Найти коэффициенты отражения и прохождения в потенциале:  $U(x) = \{U_0; x > 0, 0; x < 0\}$ ; где  $U_0 > 0$ .
6. Вычислите следующие коммутаторы:  $[L^2, r^2]$ ,  $[L^2, p^2]$ ,  $[L_i, r_j]$ .
7. Найти спектр и собственные функции плоского ротатора.
8. Частица в бесконечно глубокой яме шириной  $a$  в начальный момент времени  $t = 0$  находится в состоянии  $\varphi(x) = A \sin^3(x/a)$ . Найти волновую функцию в произвольный момент времени  $t > 0$ . Является ли временная эволюция волновой функции периодической?
9. Используя вариационный принцип Ритца, определить энергию основного состояния частицы в потенциале  $U(x) = -\alpha\delta(x)$ ,  $\alpha > 0$ . Пробную волновую функцию основного состояния взять в виде:  $\varphi(x) = A \exp[-\beta|x|]$ , где  $\beta$  — вариационный параметр.
10. Определить собственные значения и собственные функции оператора  $\sigma_x$ .
11. Найти в первом борновском приближении дифференциальное сечение рассеяния частиц с энергией  $E$  на потенциале  $U(r) = U_0 \exp(-r/R)$ , где  $U_0$  и  $R$  — положительные константы.
12. На линейный гармонический осциллятор накладывают возмущение вида:  $V(x; t) = \{\alpha x^2 |t|, |t| < \tau; 0, |t| > \tau$ . Определить вероятность перехода между основным и возбужденными состояниями.
13. Определить сечение рассеяния в борновском приближении на прямоугольной потенциальной яме.

### Описание технологии проведения

На решение заданий контрольной работы выделяется 2 академических часа. При решении задач студент может пользоваться заранее подготовленными методическими материалами.

### Требования к выполнению заданий (или шкалы и критерии оценивания)

Оценка «отлично»: Подробные и безошибочные решения всех задач, допускаются незначительные

*вычислительные неточности.*

Оценка «хорошо»: *Подробные решения всех задач, выбор правильного хода решения для всех задач, допускаются вычислительные неточности, а также неполное выполнение отдельных заданий.*

Оценка «удовлетворительно»: *решение отдельных задач, допускаются незначительные неточности в выборе метода и хода решения задачи.*

Оценка «неудовлетворительно» *отсутствие правильно решенных задач, использование ошибочных методов и приемов для решения поставленных задач.*

## 20.2. Промежуточная аттестация

Промежуточная аттестация по дисциплине осуществляется с помощью следующих оценочных средств:

### Перечень вопросов к зачету 1

1. Уравнения Максвелла в дифференциальной и интегральной форме.
2. Плотность энергии и плотность потока энергии.
3. Уравнения Максвелла для постоянного электрического поля, связь напряженности  $\mathbf{E}$  и электростатического потенциала  $\varphi$ .
4. Уравнение Пуассона на потенциал  $\varphi$  и его решение.
5. Потенциал и напряженность поля точечного заряда и системы точечных зарядов.
6. Энергия взаимодействия двух (нескольких) точечных зарядов.
7. Потенциал и напряженность поля на больших расстояниях от системы неподвижных зарядов. Определение дипольного момента.
8. Энергия диполя в квазиоднородном внешнем поле, действующие на него сила и момент сил.
9. Уравнения Максвелла для постоянного магнитного поля. Векторный потенциал, неоднозначность определения векторного потенциала.
10. Уравнение Пуассона для векторного потенциала и его решение.
11. Закон Био—Савара—Лапласа для объемных и квазилинейных токов.
12. Определение магнитного момента. Векторный потенциал и магнитная индукция на больших расстояниях.
13. Магнитный момент плоского контура с током. Магнитный момент точечных частиц.
14. Собственная энергия и энергия взаимодействия постоянных токов через коэффициенты самоиндукции и взаимной индукции.
15. Потенциальная функция тока в квазиоднородном магнитном поле. Сила и момент сил, действующие на проводник с током.
16. Уравнения для электромагнитных потенциалов (неоднородные волновые уравнения), связь векторов поля и потенциалов поля, условие Лоренца.
17. Волновое уравнение (однородное). Напряженность электрического поля в плоской монохроматической волне.
18. Дифференциальная и полная интенсивности излучения в длинноволновом приближении.
19. Сечение рассеяния электромагнитной волны свободным электроном (формула Томсона).
20. Система уравнений Максвелла в средах.
21. Понятия поляризуемости и намагниченности среды.
22. Условия квазистационарности электромагнитного поля.
23. Скин-эффект. Толщина скин-слоя.
24. Уравнения для электромагнитных волн в диэлектриках в отсутствие дисперсии.
25. Дисперсия диэлектрической проницаемости.

### Перечень вопросов к зачету 2

1. Укажите основные свойства волновой функции.
2. Какой физический смысл имеет квадрат модуля волновой функции?
3. Напишите уравнение непрерывности.
4. Напишите нестационарное уравнение Шрёдингера.
5. Напишите оператор кинетической энергии и момента импульса.
6. Если задано состояние  $\Psi(x; t)$ , напишите определение среднего значения физической величины  $A$  в состоянии  $\Psi$ .

7. Напишите закон изменения среднего значения физической величины  $A$ . В каком случае  $A$  есть интеграл движения.
8. Дайте определение стационарного состояния.
9. Напишите спектр линейного гармонического осциллятора (одномерный случай).
10. Напишите условия применимости квазиклассического приближения.
11. Напишите правило квантования Бора-Зоммерфельда.
12. Напишите (с экспоненциальной точностью) вероятность туннелирования частицы через барьер.
13. Какие величины сохраняются в центральном поле.
14. Напишите спектр атома водорода.
15. Напишите выражения для поправок к энергии изолированного уровня в первом и втором порядках теории возмущении.
16. Напишите золотое правило Ферми.
17. Напишите точное выражение для амплитуды рассеяния.
18. В чем состоит борновское приближение в теории рассеяния.

### Описание технологии проведения

Зачет проходит в письменной форме. Студенту предлагается 15 вопросов из полного списка вопросов, на которые он должен дать краткий ответ в течение одного академического часа.

### Требования к выполнению заданий, шкалы и критерии оценивания

«Зачтено»: даны правильные и полные ответы на 10 и более вопросов, допускаются погрешности, которые студент способен скорректировать под руководством преподавателя

«Не зачтено»: правильные и полные ответы даны на менее, чем 10 вопросов; ответы на вопросы содержат неточности и ошибки, которые студент не способен скорректировать под руководством преподавателя.

## 21. Фонд оценочных средств

### Тесты

1. Закон сохранения заряда в интегральной форме.

$$\text{Ответ: } \frac{dQ(t)}{dt} = -J$$

2. Закон Био–Савара–Лапласа для элемента линейного тока.

$$\text{Ответ: } d\mathbf{B} = \frac{J [d\mathbf{l} \times \mathbf{r}]}{c r^3}$$

3. Уравнения Максвелла в дифференциальной форме для поля в вакууме.

$$\begin{aligned} \text{div} \mathbf{E} &= 4\pi\rho, \\ \text{rot} \mathbf{B} &= \frac{4\pi}{c} \mathbf{j} + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}, \\ \text{div} \mathbf{B} &= 0, \\ \text{rot} \mathbf{E} &= -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}. \end{aligned}$$

4. Уравнение Пуассона для потенциала скалярного потенциала  $\varphi$ .

$$\text{Ответ: } \Delta\varphi = -4\pi\rho$$

5. Определение дипольного момента.

$$\begin{aligned} \text{Ответ: } \mathbf{d} &= \int \rho(\mathbf{r}) \mathbf{r} dV \quad (\text{для непрерывного распределения заряда}), \\ \mathbf{d} &= \sum_a e_a \mathbf{r}_a \quad (\text{для системы точечных зарядов}). \end{aligned}$$

6. Прямые и обратные преобразования Лоренца.

$$\begin{cases} x' = \frac{x - Vt}{\sqrt{1 - V^2/c^2}}, \\ y' = y, \\ z' = z. \end{cases} \quad \begin{cases} x = \frac{x' + Vt'}{\sqrt{1 - V^2/c^2}}, \\ y = y', \\ z = z'. \end{cases}$$

Ответ: Прямые:

Обратные:

7. Определение электрической индукции  $D$  и напряженности магнитного поля  $H$ .

$$\text{Ответ: } D = E + 4\pi P, \quad H = B - 4\pi M,$$

где  $P$  — вектор поляризации среды,  $M$  — вектор намагничивания.

8. Закон Ома в дифференциальной форме и для участка проводника.

$$\text{Ответ: } \mathbf{j} = \sigma \mathbf{E}, \quad J = \frac{U}{R}.$$

9. Что такое «стационарное состояние»? Записать общий вид волновой функции стационарного состояния, пояснив, откуда что находится.
10. Записать уравнение Шрёдингера для стационарных состояний атома лития (атомное ядро и 3 электрона), пояснив все обозначения. Движением атомного ядра пренебречь.
11. Привести вид оператора спина электрона и спиновых волновых функций.
12. Записать вид энергетического спектра одномерного квантового осциллятора (указать возможные значения квантового числа).
13. Частица движется в поле сферической симметрии. Какие физические величины у нее сохраняются, каковы для них спектры собственных значений?
14. Сформулировать идею решения задачи по теории возмущений. Для случая отсутствия вырождения записать поправки низших порядков к энергии, пояснив все обозначения.
15. Сформулируйте идею де-Бройля. Каков статистический смысл квадрата модуля волновой функции?

### Задачи

1. Теорема Гаусса.

$$\text{Ответ: } \oint \mathbf{E} d\mathbf{S} = 4\pi Q_{\text{вхл}}$$

2. Закон электромагнитной индукции.

$$\text{Ответ: } \mathcal{E} = -\frac{1}{c} \frac{d\Phi}{dt}$$

3. Плотность импульса электромагнитного поля.

$$\text{Ответ: } \mathbf{g} = \frac{1}{4\pi c} [\mathbf{E} \times \mathbf{B}]$$

4. Потенциал поля на больших расстояниях от системы неподвижных зарядов (без квадрупольного члена).

$$\text{Ответ: } \varphi(\mathbf{r}) = \frac{q}{r} + \frac{(\mathbf{dr})}{r^3} + \dots$$

5. Спектральная плотность электро-дипольного излучения.

$$\text{Ответ: } \frac{d\mathcal{E}}{d\omega} = \frac{2\omega^4}{3\pi c^3} |\mathbf{d}_\omega|^2$$

6. Инварианты электромагнитного поля.

$$\text{Ответ: } E^2 - B^2 = \text{inv}, \quad (\mathbf{E}\mathbf{B}) = \text{inv}.$$

7. Закон Джоуля-Ленца в дифференциальной форме и для участка проводника.

Ответ:

( $q$  — количество теплоты, выделяющейся в единицу времени в единичном объеме проводника,  $Q$  — количество тепла, выделяющегося на участке цепи в единицу времени).

8. Записать уравнение Шрёдингера для стационарных состояний (для случая одной частицы), пояснив все обозначения.

Ответ:  $\hat{H}\Psi(\vec{r}) = E\Psi(\vec{r}); \hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2m}\vec{\nabla}^2 + U(\vec{r})$ .

Здесь в гамильтониане  $\hat{H}$   $\hbar$  — постоянная Планка,  $m$  — масса частицы,  $\vec{\nabla} = \frac{\partial}{\partial \vec{r}}$  —

оператор градиента по координате частицы  $\vec{r}$ ,  $U(\vec{r})$  — потенциальная энергия частицы.

9. Записать уравнение Шрёдингера для стационарных состояний атома гелия с учетом движения атомного ядра, пояснив все обозначения.

$$\hat{H}\Psi(\vec{R}, \vec{r}_1, \vec{r}_2) = E\Psi(\vec{R}, \vec{r}_1, \vec{r}_2);$$

Ответ:  $\hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2m_n}\vec{\nabla}_{\vec{R}}^2 - \frac{\hbar^2}{2m_e}\sum_{j=1}^2\vec{\nabla}_j^2 - \sum_{j=1}^2\frac{2e^2}{|\vec{R}-\vec{r}_j|} + \frac{e^2}{r_{12}}$ .

Здесь в гамильтониане  $\hat{H}$   $\hbar$  — постоянная Планка,  $m_n$  — масса ядра атома гелия,

$\vec{\nabla}_{\vec{R}} = \frac{\partial}{\partial \vec{R}}$  — оператор градиента по координате атомного ядра  $\vec{R}$ ,  $m_e$  — масса

электрона,  $\vec{\nabla}_j = \frac{\partial}{\partial \vec{r}_j}$  — оператор градиента по координате  $j$ -го электрона  $\vec{r}_j$  ( $j = 1$  или

2),  $e$  — электрический заряд электрона,  $r_{12} = |\vec{r}_1 - \vec{r}_2|$ .

10. Записать уравнение Паули, пояснив все обозначения.

$$i\hbar\frac{\partial\Psi(\vec{r}, t)}{\partial t} = \hat{H}\Psi(\vec{r}, t);$$

Ответ:  $\hat{H} = \frac{1}{2m_e}[\vec{\nabla} + \frac{e}{c}\vec{A}(\vec{r}, t)]^2 + U(\vec{r}) - e\varphi(\vec{r}, t) + \frac{e\hbar}{2m_e c}\vec{\sigma}\vec{H}$ .

Здесь  $m_e$  — масса электрона,  $\vec{\nabla} = \frac{\partial}{\partial \vec{r}}$  — оператор градиента по координате частицы  $\vec{r}$ ,

$e$  — модуль электрического заряда электрона,  $c$  — скорость света,  $\vec{A}(\vec{r}, t)$  и  $\varphi(\vec{r}, t)$  —

векторный и скалярный потенциалы электромагнитного поля,  $U(\vec{r})$  – потенциальная энергия частицы,  $\vec{H} = \text{rot}\vec{A}$  – напряженность магнитного поля,  $\vec{\sigma}$  – матрицы Паули:

$$\sigma_x = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}; \quad \sigma_y = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}; \quad \sigma_z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}.$$

11. Записать вид энергетического спектра двумерного квантового осциллятора (указать возможные значения квантового числа).

*Ответ:*  $E_n = \hbar\omega(n+1); n = 0, 1, 2, \dots$

$\omega$  – круговая частота колебаний.

12. Частица движется в центральном поле. Какие физические величины у нее сохраняются, каковы для них спектры собственных значений?

*Ответ:* Энергия  $E$  (если центральное поле не меняется со временем), квадрат углового момента  $\vec{L}^2$  ( $\vec{L}^2 = \hbar^2 l(l+1), l = 0, 1, 2, \dots$ ), проекция углового момента на ось  $z$   $L_z$  ( $L_z = \hbar m, m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ), четность  $\pi_l = (-1)^l$ .

13. Сформулировать идею решения задачи по теории возмущений. Для случая отсутствия вырождения записать поправку первого порядка к волновой функции, пояснив все обозначения.

*Ответ:* Решаем уравнение Шредингера  $\hat{H}\Psi_l = E_l\Psi_l$ . Представляем гамильтониан в виде:  $\hat{H} = \hat{H}_0 + \hat{V}$ , где  $\hat{H}_0$  – гамильтониан, для которого известно решение уравнения Шредингера  $\hat{H}_0\Psi_n^{(0)} = E_n^{(0)}\Psi_n^{(0)}$ , и  $\hat{V}$  – оператор возмущения, содержащий малый параметр. Тогда энергия  $E$  и волновая функция  $\Psi$  ищутся в виде рядов по степеням малого параметра с использованием величин  $E_n^{(0)}$ ,  $\Psi_n^{(0)}$  и матричных элементов  $V_{nl}$ :

$$V_{nl} = \int \Psi_n^{(0)} \hat{V} \Psi_l^{(0)} d\xi.$$

Волновая функция  $\Psi_l$  в первом порядке теории возмущений имеет вид:

$$\Psi_l = \Psi_l^{(0)} + \sum_{n \neq l} \frac{V_{nl}}{E_l^{(0)} - E_n^{(0)}} \Psi_n^{(0)} + \dots$$

14. Сформулировать идею прямого вариационного метода.

*Ответ:* Известен вид гамильтониана  $\hat{H}$  заданной системы и требуется найти решение уравнения Шредингера для основного стационарного состояния:

$$\hat{H}\Psi_0(\xi) = E_0\Psi_0(\xi).$$

Задается пробная функция  $\Phi(\xi, \alpha, \beta, \gamma \dots)$ , которая удовлетворяет стандартным условиям и условию нормировки:

$$\int \Phi^*(\xi, \alpha, \beta, \gamma \dots)\Phi(\xi, \alpha, \beta, \gamma \dots)d\xi = 1.$$

Рассчитывается функционал

$$J(\alpha, \beta, \gamma \dots) = \int \Phi^*(\xi, \alpha, \beta, \gamma \dots)\hat{H}\Phi(\xi, \alpha, \beta, \gamma \dots)d\xi.$$

После этого проводится процедура его минимизации:

$$\frac{\partial J}{\partial \alpha} = 0; \quad \frac{\partial J}{\partial \beta} = 0; \quad \frac{\partial J}{\partial \gamma} = 0 \dots, \text{ из которой находятся минимизирующие функционал}$$

параметры  $\alpha_0, \beta_0, \gamma_0 \dots$ . Тогда приближенное решение исходного уравнения Шредингера будет иметь вид.

$$\Psi_0(\xi) \approx \Phi(\xi, \alpha_0, \beta_0, \gamma_0 \dots); \quad E_0 \approx J(\alpha_0, \beta_0, \gamma_0 \dots).$$

15. Привести выражение для вычисления вероятности квантового перехода (иначе - записать «Золотое правило Ферми»), пояснив все обозначения.

*Ответ:* Предполагается, что возмущение от времени зависит только периодически:

$$\hat{V}(\xi, t) \rightarrow \hat{V}^{(\pm)}(\xi, t) = \hat{V}^{(\pm)}(\xi) \cdot e^{\pm i\omega t}.$$

Тогда вероятность квантового перехода системы из состояния  $m$  в состояние  $n$  в единицу времени имеет вид («Золотое правило Ферми»):

$$W_{m \rightarrow n}^{(\pm)} = \frac{2\pi}{\hbar} |V_{nm}^{(\pm)}|^2 \rho(\varepsilon), \quad \varepsilon = \pm (E_m - E_n).$$

Здесь  $\rho(\varepsilon)$  - плотность конечных (или начальных состояний) при испускании (знак (+)) (или поглощении знак (-)) излучения,

$$V_{nm}^{(\pm)} = \int \Psi_n^{(0)*}(\xi) V^{(\pm)}(\xi) \Psi_m^{(0)}(\xi) d\xi.$$

#### Критерии и шкалы оценивания:

Для оценивания выполнения заданий используется балльная шкала:

1) открытые задания (тестовые, средний уровень сложности):

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

2) задания с развернутым ответом:

- 5 баллов – указан верный ответ;
- 2 балла – указан частично верный ответ;
- 0 баллов – указан неверный ответ.