


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

22.04.2024 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 №4 от 18.04.2024 г.

8. Учебный год: 2026 - 2027

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*
1. Лекции			
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.	https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256
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.	https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256
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.	https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256
1.4	Излучение и рассеяние электромагнитных волн	Уравнения для электромагнитных потенциалов. Электромагнитные волны. Плоские монохроматические волны. Поляризация волн. Запоздывающие потенциалы. Общая теория излучения. Дипольное излучение. Магнитно-дипольное и квадрупольное излучения. Торможение излучением. Спектральное разложение излучения. Рассеяние электромагнитных волн.	https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256
1.5	Система уравнений Максвелла в средах	Уравнения электромагнитного поля в поляризующихся и намагничивающихся средах.	https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256
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.	https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256
1.7	Квазистационарные токи и поля	Квазистационарное приближение. Система линейных проводников. Скин-эффект.	https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256
1.8	Электромагнитные волны в средах	Электромагнитные волны в диэлектриках в отсутствие дисперсии. Дисперсия диэлектрической проницаемости. Отражение и преломление. Распространение волн в неоднородной среде.	https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256
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	https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256

		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.	https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256
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.	https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256
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.	https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256
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.	https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256
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.	https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256
2. Практические занятия			
2.1	Основные уравнения электромагнитного поля в вакууме	Уравнения Максвелла. Стационарные уравнения Максвелла. Интегральные уравнения.	https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256
2.2	Постоянное электрическое поле	Система уравнений Максвелла для стационарных электрических полей. Теорема Гаусса. Уравнение Пуассона для стационарного потенциала.	https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256
2.3	Постоянное магнитное поле	Закон Ампера. Уравнение Пуассона векторного потенциала. Закон Био-Савара-Лапласа.	https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256
2.4	Излучение и рассеяние электромагнитных волн	Волновое уравнение. Плоские монохроматические волны. Дипольное излучение. Магнитно-дипольное и квадрупольное излучения. Спектральное разложение излучения.	https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256
2.5	Система уравнений Максвелла в средах	Уравнения Максвелла в средах. Линейная и нелинейная среда.	https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256
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.	https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256
2.7	Квазистационарные токи и поля	Скин-эффект	https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256
2.8	Электромагнитные волны в средах	Генерация гармоник, самофокусировка.	https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256

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.	https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256
2.10	Простейшие применения квантовой механики	Частица в прямоугольной потенциальной яме. Линейный гармонический осциллятор. Прохождение и отражение частиц для одномерного движения.	https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256
2.11	Движение частицы в поле центральных сил	Состояния дискретного спектра в центральных полях. Состояния с малой энергией связи.	https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256
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.	https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256
2.13	Теория квантовых переходов под влиянием внешнего возмущения	Квантовые переходы, золотое правило Ферми. Правила отбора для дипольного излучения.	https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256
2.14	Элементы квантовой теории рассеяния	Борновское приближение для амплитуды рассеяния.	https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29256

* 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 : « http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=100 »
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 : http://www.lib.vsu.ru/elib/texts/method/vsu/m16-09.pdf
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 : http://www.lib.vsu.ru/elib/texts/method/vsu/m17-102.pdf

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 : « https://biblioclub.lib.vsu.ru/index.php?page=book&id=240549&sr=1 »
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 : « http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=606 ».
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 : « http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=544 »
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	http://www.lib.vsu.ru/
19	https://biblioclub.lib.vsu.ru/
20	https://lanbook.lib.vsu.ru/

* 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 α 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 θ .
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 ω . 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 ω_1 а другая вращается с постоянной угловой скоростью ω_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 ω . 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: $U(x) = \begin{cases} U_0; & x > 0, \\ 0; & x < 0; \end{cases}$ где $U_0 > 0$.
6. Вычислите следующие коммутаторы: $[L^2, r^2]$, $[L^2, p^2]$, $[L_i, r_p]$.
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 β — вариационный параметр.
10. Определить собственные значения и собственные функции оператора σ_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: $V(x; t) = \begin{cases} \alpha x^2 |t|/t_j, & |t| < t_j \\ 0, & |t| > t_j \end{cases}$. 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 φ .
4. Уравнение Пуассона на потенциал φ 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 объёмных 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 Ψ .

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 возмущения.
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 φ .

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

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.

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

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.

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

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.

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

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.

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

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

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.

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

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

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

ω – 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 Ψ 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 Ψ_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.