


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

. 2022 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

Б1.В.ДВ.01.01 – Квантовая теория и квантовые компьютеры

Код и наименование дисциплины в соответствии с учебным планом

1. Код и наименование направления подготовки/специальности:

09.03.01 – информатика и вычислительная техника

2. Профиль подготовки/специализация: Вычислительные машины, комплексы, системы и сети

3. Квалификация выпускника: бакалавр

4. Форма обучения: очная (дневная)

5. Кафедра, отвечающая за реализацию дисциплины: 0802 – теоретической физики

6. Составители программы Корнев Алексей Станиславович

ФИО

д.ф.-м.н.

доцент

ученая степень

ученое звание

7. Рекомендована: НМС физического факультета от 17.06.2022 г. протокол № 6

(наименование рекомендующей структуры, дата, номер протокола)

8. Учебный год: 2024 – 2025

Семестр(ы)/Триместр(ы): 6

### 9. Цели и задачи учебной дисциплины:

Цель дисциплины – дать студентам глубокое понимание закономерностей микромира, научить применять вычислительные методы квантовой теории для решения различных прикладных задач. Студент должен овладеть математическим аппаратом нерелятивистской квантовой теории, приобрести навыки его практического применения и на этой основе получать ясное представление о физической природе квантовых явлений, иметь четкое представление о границах применимости квантовых законов и используемых вычислительных методов. Он должен понимать, что квантовая механика есть научная основа современных нанотехнологий.

### 10. Место учебной дисциплины в структуре ООП:

Дисциплина «Квантовая теория и квантовые компьютеры» относится к дисциплинам по выбору вариативной части математического и естественнонаучного цикла основной образовательной программы по направлению 09.03.01 — Информатика и вычислительная техника.

### 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-6	Способность принимать участие в разработке систем телекоммуникаций	ПК-6.2	Применение на практике математического и физического аппарата при решении профессиональных задач в области систем телекоммуникаций	<p>знать: основные положения и методы квантовой механики;</p> <p>уметь: использовать в профессиональной деятельности знания о свойствах квантовых объектов и методах их исследования, применять полученные знания для освоения профильных дисциплин и решения профессиональных задач;</p> <p>Владеть: практическими методами исследования квантовых систем и применять их на практике при решении профессиональных задач</p>

### 12. Объем дисциплины в зачетных единицах/час. (в соответствии с учебным планом) — 4 / 144.

Форма промежуточной аттестации (зачет/экзамен) экзамен

### 13. Трудоемкость по видам учебной работы

Вид учебной работы	Трудоемкость			
	Всего	По семестрам		
		6		...
Аудиторные занятия	56	56		
в том числе:	Лекции	28	28	
	практические	28	28	
	лабораторные			
Самостоятельная работа	52	52		
в том числе: курсовая работа (проект)				
Форма промежуточной аттестации (экзамен – __ час.)	Экзамен – 36	Экзамен – 36		
Итого:	144	144		

### 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	Введение. Волновая функция	Основы квантовой теории. Основные трудности классической теории. Краткий очерк истории становления квантовой теории. Квантовые состояния. Волновая функция. Вероятностная интерпретация. Принцип суперпозиции. Волновой пакет.	-
1.2	Операторы физических величин и их свойства	Средние значения координат и импульсов. Алгебра операторов. Собственные значения и собственные функции операторов. Свойства собственных значений и собственных функций линейных эрмитовых операторов. Ортогональность и нормировка собственных функций оператора с дискретным спектром. Условие совместного измерения различных механических величин. Соотношение неопределенностей.	-
1.3	Уравнение Шредингера	Постулирование уравнения Шредингера. Стационарное уравнение Шредингера. Уравнение непрерывности.	-
1.4	Изменение состояний со временем	Стационарные состояния. Свойства стационарных состояний. Дифференцирование операторов по времени. Квантовые скобки Пуассона. Интегралы движения. Связь интегралов движения с симметрией задачи. Теоремы Эренфеста.	-
1.5	Одномерные задачи	1-мерные задачи. Свойства финитного 1-мерного движения. Линейный гармонический осциллятор, спектр энергий, волновые функции стационарных состояний.	-
1.6	Движение в центральном поле	Общая теория движения в центральном поле. Собственные функции и собственные значения операторов квадрата углового момента и его проекции на данное направление. Разделение переменных в центральном поле. Радиальное уравнение Шредингера. Общие свойства решения. Атом водорода. Решение радиального уравнения. Энергетический спектр.	-
1.7	Нерелятивистская теория спина электрона	Спиновый момент электрона. Матричная форма операторов. Матрицы Паули. Волновые функции спиновых состояний. Спиновая переменная. Спинор. Движение заряженной частицы в магнитном поле. Уравнение Паули. Двухуровневая система.	-
1.8	Теория квантовых компьютеров	Кубит. Однокубитовые гейты. Квантовый интерферометр. Квантовый регистр. Многокубитовые гейты. Невозможность клонирования кубита. Состояния Белла. Квантовый параллелизм.	-
<b>2. Практические занятия</b>			
2.1	Введение. Волновая функция	Основы квантовой теории. Основные трудности классической теории. Краткий очерк истории становления квантовой теории. Квантовые состояния. Волновая функция. Вероятностная интерпретация. Принцип суперпозиции. Волновой	-

		пакет.	
2.2	Операторы физических величин и их свойства	Средние значения координат и импульсов. Алгебра операторов. Собственные значения и собственные функции операторов. Свойства собственных значений и собственных функций линейных эрмитовых операторов. Ортогональность и нормировка собственных функций оператора с дискретным спектром. Условие совместного измерения различных механических величин. Соотношение неопределенностей.	-
2.3	Уравнение Шредингера	Постулирование уравнения Шредингера. Стационарное уравнение Шредингера. Уравнение непрерывности.	-
2.4	Изменение состояний со временем	Стационарные состояния. Свойства стационарных состояний. Дифференцирование операторов по времени. Квантовые скобки Пуассона. Интегралы движения. Связь интегралов движения с симметрией задачи. Теоремы Эренфеста.	-
2.5	Одномерные задачи	1-мерные задачи. Свойства финитного 1-мерного движения. Линейный гармонический осциллятор, спектр энергий, волновые функции стационарных состояний.	-
2.6	Движение в центральном поле	Общая теория движения в центральном поле. Собственные функции и собственные значения операторов квадрата углового момента и его проекции на данное направление. Разделение переменных в центральном поле. Радиальное уравнение Шредингера. Общие свойства решения. Атом водорода. Решение радиального уравнения. Энергетический спектр.	-
2.7	Нерелятивистская теория спина электрона	Спиновый момент электрона. Матричная форма операторов. Матрицы Паули. Волновые функции спиновых состояний. Спиновая переменная. Спинор. Движение заряженной частицы в магнитном поле. Уравнение Паули. Двухуровневая система.	-
2.8	Теория квантовых компьютеров	Кубит. Однокубитовые гейты. Квантовый интерферометр. Квантовый регистр. Многокубитовые гейты. Невозможность клонирования кубита. Состояния Белла. Квантовый параллелизм.	-

\* 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)				Всего
		Лекции	Практические	Лабораторные	Самостоятельная работа	
6 семестр						
1	Введение. Волновая функция	2	2		4	8
2	Операторы физических величин и их свойства	4	4		10	18
3	Уравнение Шредингера	2	2		6	10
4	Изменение состояний со временем	2	4		6	12
5	Одномерные задачи	4	6		6	16
6	Движение в центральном поле	4	4		6	14

7	Нерелятивистская теория спина электрона	4	4		6	14
8	Теория квантовых компьютеров	6	2		8	16
	Итого:	28	28		52	108

#### 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 строго следовать рекомендациям преподавателя по изучению материала. Систематически выполнять задания, предлагаемые преподавателем.

#### 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	Давыдов, А.С. Квантовая механика / А.С. Давыдов. — СПб: БХВ–Петербург, 2014. — 703 с.
2	Запрягаев, С.А. Введение в квантовые информационные системы / С.А. Запрягаев – Воронеж. гос. ун-т, 2015 – 219 с.

б) дополнительная литература:

№ п/п	Источник
3	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.
4	Балашов, В.В. Курс квантовой механики : Учебное пособие для студ. физ.фак. Ч. 1 / В.В. Балашов, В.К. Долинов. — М. : Изд-во Моск. ун-та, 1974. — 379 с.
5	Балашов, В.В. Курс квантовой механики : Учебное пособие для студ. физ.фак. Ч. 2 / В.В. Балашов, В.К. Долинов. — М. : Изд-во Моск. ун-та, 1978. — 196 с.
6	Соколов А.А. Квантовая механика / А.А. Соколов, И.М. Тернов, В.Ч. Жуковский. — М. : Наука : Физматлит, 1979. — 528 с.
7	Ландау, Л.Д. Теоретическая физика. Т. III: Квантовая механика (нерелятивистская теория) / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. — М.: Физматлит, 2001. — 803 с.
8	Блохинцев, Д.И. Основы квантовой механики / Д.И. Блохинцев. — СПб: Лань, 2004. — 664 с.

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

№ п/п	Ресурс
9	<a href="http://www.lib.vsu.ru/elib/texts/method/vsu/m20-121.pdf">http://www.lib.vsu.ru/elib/texts/method/vsu/m20-121.pdf</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	Флюгге, З. Задачи по квантовой механике : в 2 ч. / З. Флюгге ; пер. с англ. Б.А. Лысова; под ред. А.А. Соколова. — Череповец : Меркурий-Пресс, 2000.

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

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

Лекционная аудитория, доска, учебная литература, дисплейный класс.

**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 - 6	ПК – 6.2	контрольная работа
Промежуточная аттестация форма контроля – экзамен				Список 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:

Контрольная работа

*(наименование оценочного средства текущего контроля успеваемости)*

**Пример варианта контрольной работы**

1. Какие из перечисленных функций соответствуют одинаковым состояниям? (2)

$$\alpha e^{-\alpha x^2 + \beta}, \quad e^{\alpha x} e^{-\alpha(x+1)^2}, \quad e^{\ln \beta + \alpha(x^2 - 1)}$$

2. Раскрыть скобки (4):

$$(\hat{L}_z - \hat{p}_z)^2, \quad (\hat{p}_x^2 - x)^2$$

3. Показать, что функция  $\varphi = A e^{-x^2/2}$  является собственной функцией

оператора  $\hat{R} = -\frac{d^2}{dx^2} + x^2$  и найти собственное значение, которому она удовлетворяет. (3)

4. Записать соотношение неопределенностей для следующих физических величин:  $(p_x, L_z)$ . (2)

5. Вычислить среднее значение  $p_x$  в произвольном стационарном состоянии частицы массой  $m$  в яме шириной  $a$  с двумя бесконечно высокими стенками. Привести явный вид волновой функции. (5)

6. Есть ли общие собственные функции у операторов  $(\hat{y}, \hat{L}_z)$ ? (2)

7. Какие значения момента  $L_z$  и с какой вероятностью будут наблюдаться на эксперименте, если состояние системы описывается волновой функцией

$$\Psi(\varphi) = a(\cos^2 2\varphi + \sin \varphi) ? \text{ Найти } \langle L_z \rangle \text{ и } \langle (\Delta L_z)^2 \rangle. (8)$$

8. Показать, что состояния Белла  $|q_{00}\rangle_2$  и  $|q_{01}\rangle_2$  ортогональны и нормированы на единицу. (2)

9. Найти  $\langle s_x \rangle$  в состоянии с  $s_z = \hbar/2$ . (2)

### 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 (25–30 баллов).*

Оценка «хорошо»: *Подробные решения всех задач, выбор правильного хода решения для всех задач, допускаются вычислительные неточности, а также неполное выполнение отдельных заданий (19–24 балла).*

Оценка «удовлетворительно»: *решение отдельных задач, допускаются незначительные неточности в выборе метода и хода решения задачи (13–18 баллов).*

Оценка «неудовлетворительно» *отсутствие правильно решенных задач, использование ошибочных методов и приемов для решения поставленных задач (12 или менее баллов).*

## 20.2. Промежуточная аттестация

Промежуточная аттестация по дисциплине осуществляется с помощью следующих оценочных средств:

*(наименование оценочного средства промежуточной аттестации)*

1. Квантовые состояния. Волновые функции. Принцип суперпозиции состояний.
2. Среднеквадратичное отклонение (дисперсия) физической величины.
3. Собственные значения и собственные функции линейных эрмитовых операторов.
4. Условия совместной измеримости нескольких физических величин.
5. Соотношение неопределенностей.
6. Уравнение Шредингера (временное, стационарное). Стационарные состояния. Их свойства.
7. Уравнение непрерывности. Плотность потока вероятности.
8. Дифференцирование операторов по времени. Интегралы состояния.
9. Квантовая теория линейного гармонического осциллятора.
10. Момент количества движения (орбитальный момент).
11. Разделение переменных в уравнении Шредингера в центральном поле. Спектроскопические символы.
12. Теория атома водорода.
13. Нерелятивистская теория спина. Оператор спина. Спиновые функции.
14. Уравнение Паули.
15. Двухуровневая система.
16. Кубит. Однокубитовые гейты. Квантовый интерферометр.
17. Квантовый регистр. Многокубитовые гейты.
18. Невозможность клонирования кубита. Состояния Белла. Квантовый параллелизм.

### Описание технологии проведения

Экзамен проходит в устной форме. Студенту предлагается 2 вопроса из полного списка вопросов, на которые он должен дать развернутый ответ в течение одного академического часа. В случае, если студент имеет оценку «неудовлетворительно» по контрольной работе текущей аттестации, ему также предлагается одна из задач из контрольной работы.

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

*«Отлично»: Подробные и безошибочные ответы на основные и дополнительные вопросы, полное понимание и свободное владение материалом, умение решать практические задачи*

*«Хорошо»: Подробные ответы на поставленные вопросы с мелкими ошибками, незначительные пробелы в знании материала, умение решать практические задачи*

*«Удовлетворительно»: Неудовлетворительные ответы на один из основных вопросов КИМа и некоторые дополнительные вопросы, неполное знание или понимание материала, низкие навыки решения практических задач*

*«Неудовлетворительно»: плохое знание материала, неудовлетворительные ответы на вопросы КИМа и большинство дополнительных вопросов, отсутствие навыков решения практических задач*