**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**
**Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова**

Кафедра теоретической физики

УТВЕРЖДАЮ

Декан физического факультета
_____ И.С. Огнев
*(подпись)*

«17» мая 2022 г.

**Рабочая программа дисциплины**
**«Квантовая механика»**

Направление подготовки
03.03.03 Радиофизика

Направленность (профиль)
Телекоммуникационные системы и технологии

Форма обучения
очная

Программа одобрена
на заседании кафедры
от «18» апреля 2022 года, протокол № 8

Программа одобрена НМК
физического факультета
протокол № 5 от «11» мая 2022 года

Ярославль

## 1. Цели освоения дисциплины

Целями освоения дисциплины «Квантовая механика» являются изучение основ нерелятивистской квантовой механики и приобретение навыков использования аппарата квантовой механики для описания конкретных моделей, связанных со строением атома и элементарных частиц.

## 2. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Дисциплина «Квантовая механика» относится к обязательной части образовательной программы и входит в модуль «Теоретическая физика».

Для освоения данной дисциплиной студенты должны владеть математическим аппаратом векторного и тензорного анализа, линейной алгебры, дифференциального исчисления, уметь решать основные типы дифференциальных уравнений, знать специальные функции математической физики и их свойства, знать основы теоретической механики и электродинамики, иметь представление об основных понятиях физики атома и атомного ядра.

Полученные в курсе «Квантовая механика» знания необходимы для изучения таких дисциплин как Квантовая радиофизика, Физическая электроника и других

## 3. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих элементов компетенций в соответствии с ФГОС ВО, ООП ВО и приобретения следующих знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности:

| **Формируемая компетенция (код и формулировка)** | **Индикатор достижения компетенции (код и формулировка)** | **Перечень планируемых результатов обучения** |
|---|---|---|
| **Общепрофессиональные компетенции** | | |
| ОПК-1<br>Способен применять базовые знания в области физики и радиофизики и использовать их в профессиональной деятельности, в том числе педагогической деятельности | ИД-ОПК-1.1<br>Осуществляет постановку задачи, выбирает способ ее решения | **Знать:**<br>- основные теоремы и уравнения квантовой механики;<br>- приближенные методы вычислений в квантовой механике.<br><br>**Уметь:**<br>**-** воспроизводить ключевые физические принципы и математические приемы, используемые при построении квантовой механики;<br>- определять корректность использования тех или иных физических предположений и математических методов, применяемых при формулировке и решении квантово-механических задач. |
| | ИД-ОПК-1.2<br>Применяет математический аппарат, физические законы и теории для решения прикладных и теоретических задач, в том числе педагогической | **Уметь:**<br>- работать с операторами и волновыми функциями в квантовой механике;<br>- решать уравнения Шредингера для одномерного гармонического осциллятора и атома водорода;<br><br>**Владеть навыками:**<br>**-** решения уравнения Шредингера для |

| Формируемая компетенция (код и формулировка) | Индикатор достижения компетенции (код и формулировка) | Перечень планируемых результатов обучения |
|---|---|---|
| | деятельности | произвольных систем;<br>- практического применения приближенных методов вычислений в квантовой механике для решения физических задач, связанных с движением атомных частиц;<br>- работы со спиновыми волновыми функциями. |

## 4. Объем, структура и содержание дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет 4 зачетные единицы, 144 акад. часа.

| № п/п | Темы (разделы) дисциплины, их содержание | Семестр | Виды учебных занятий, включая самостоятельную работу студентов, и их трудоемкость (в академических часах) | | | | | | Формы текущего контроля успеваемости<br><br>Форма промежуточной аттестации *(по семестрам)*<br><br>*Формы ЭО и ДОТ (при наличии)* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Контактная работа | | | | | самостоятельная работа | |
| | | | лекции | практические | лабораторные | консультации | аттестационные испытания | | |
| 1 | Введение. | 6 | 4 | 2 | | | | 4 | Задания для самостоятельной работы |
| 2 | Математический аппарат квантовой механики. | 6 | 8 | 10 | | 1 | | 11 | Задания для самостоятельной работы, *Тест для самопроверки по работе с операторами в ЭУК «Кв. механика» в LMS Moodle* Самостоятельная работа №1 |
| | *в том числе с ЭО и ДОТ* | | | | | | | *2* | |
| 3 | Приложения квантовой механики. | 6 | 8 | 12 | | 2 | | 8 | Задания для самостоятельной работы |
| 4 | Спин электрона. | 7 | 4 | 2 | | | | | |
| 5 | Приближенные методы квантовой механики. | 7 | 6 | 8 | | 2 | | 10 | Задания для самостоятельной работы |
| 6 | Системы многих частиц. | 7 | 4 | | | | | 2 | |

| № п/п | Темы (разделы) дисциплины, их содержание | Семестр | Виды учебных занятий, включая самостоятельную работу студентов, и их трудоемкость (в академических часах) | | | | | | Формы текущего контроля успеваемости<br><br>Форма промежуточной аттестации *(по семестрам)*<br><br>***Формы ЭО и ДОТ (при наличии)*** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Контактная работа | | | | | самостоятельная работа | |
| | | | лекции | практические | лабораторные | консультации | аттестационные испытания | | |
| | | 6 | | | | 2 | 0,5 | 33,5 | Экзамен<br><br>*При подготовке к экзамену: Тест для самопроверки по результатам освоения дисциплины в ЭУК в LMS Moodle* |
| | *в том числе с ЭО и ДОТ* | | | | | | | *2* | |
| | **ИТОГО** | | **34** | **34** | | **7** | **0,5** | **68,5** | |
| | ***в том числе с ЭО и ДОТ*** | | | | | | | ***4*** | |

Содержание разделов дисциплины

**1. Введение.**

1.1. Введение. Место квантовой механики в физике. Экспериментальные данные, приведшие к созданию квантовой механики.

1.2. Гипотеза де Бройля. Волны де Бройля. Корпускулярно-волновой дуализм.

1.3. Волновая функция. Принцип суперпозиции. Разложение волновой функции по плоским волнам де Бройля. Статистическая интерпретация волновой функции по Борну. Естественные условия, налагаемые на функцию. Волновая функция в координатном и импульсном представлениях.

1.4. Правило квантования Бора-Зоммерфельда.

**2. Математический аппарат квантовой механики.**

2.1. Описание физических величин операторами. Алгебра операторов. Операторы координаты, импульса, момента импульса, кинетической и потенциальной энергии, гамильтониан.

2.2. Среднее значение физической величины в квантовой механике. Понятие оператора, эрмитово сопряженного к данному. Самосопряженные операторы. Вещественность средних значений физических величин. Общие свойства операторов, алгебра операторов.

2.3. Средние значения операторов и средние квадратичные отклонения от них. Собственные значения и собственные функции эрмитовых операторов и их свойства. Дискретный, непрерывный и смешанный спектры. Примеры нахождения собственных значений операторов $P_x$ и $M_z$. Основные свойства собственных функций дискретного и непрерывного спектра. Нормировка волновой функции непрерывного спектра на $\delta$ - функцию.

2.4. Условие возможности одновременного точного измерения нескольких физических величин в одном состоянии системы. Определение волновой функции

(состояния) микрообъекта полным набором независимых физических величин, характеризующих внешние условия.

2.5. Соотношение неопределенностей для физических величин. Вывод соотношения неопределенностей из аппарата квантовой механики.

2.6. Уравнение Шредингера. Сохранение нормировки волновой функции. Плотность тока вероятности. Уравнения непрерывности. Стационарное уравнение Шредингера.

**3. Приложения квантовой механики.**

3.1. Свободная частица в поле с потенциальным барьером. Коэффициенты прохождения и отражения.

3.2. Гармонический осциллятор. Спектр энергии и волновые функции.

3.3. Общая теория движения частицы в поле центральных сил. Сохранение момента импульса.

3.4 Квантование момента импульса. Собственные функции и собственные значения оператора квадрата момента импульса.

3.5. Движение в кулоновском поле. Водородоподобные атомы. Спектр энергии и волновые функции.

3.6. Движение заряженной частицы в однородном постоянном магнитном поле. Спектр энергии и волновые функции.

**4. Спин электрона.**

4.1. Экспериментальное обоснование существования собственного момента импульса электрона. Опыты Штерна-Герлаха и Эйнштейна-де Гааза.

4.2. Оператор спина. Матрицы Паули. Собственные значения и функции оператора проекции спина на произвольное направление и на направления осей декартовой системы координат.

4.3. Уравнение Шредингера для электрона в электромагнитном поле с учетом спина (уравнение Паули). Калибровочная инвариантность в квантовой механике. Плотность тока вероятности в магнитном поле.

**5. Приближенные методы квантовой механики.**

5.1. Метод теории возмущений в стационарных задачах с дискретным спектром без вырождения.

5.2 Метод теории возмущений в стационарных задачах с дискретным спектром при наличии вырождения.

5.3. Расщепление спектральных линий водородоподобного атома в электрическом поле. Эффект Штарка.

5.4. Расщепление спектральных линий водородоподобного атома во внешнем магнитном поле. Эффект Зеемана.

5.5. Влияние конечных размеров ядра водородоподобного атома на его спектр.

5.6. Нестационарная теория возмущений. Теория квантовых переходов.

5.7. Переход от квантовой механики к классической. Квазиклассическое приближение. Метод Вентцеля-Крамерса-Бриллюэна. Волновая функция в ВКБ приближении.

5.8. Туннельный эффект. Теория радиоактивного $\alpha$ – распада.

**6. Системы многих частиц.**

6.1. Система многих частиц в квантовой механике. Учет влияния движения ядра на спектр водородоподобного атома.

6.2. Система тождественных частиц. Принцип тождественности. Оператор перестановки. Уравнение Шредингера для системы, состоящей из одинаковых частиц.

6.3. Симметричные и антисимметричные волновые функции. Принцип Паули.

**5. Образовательные технологии, в том числе технологии электронного обучения и дистанционные образовательные технологии, используемые при осуществлении образовательного процесса по дисциплине**

В процессе обучения используются следующие образовательные технологии:

**Вводная лекция** – это первая лекция по дисциплине. Она дает первое целостное представление о дисциплине и ориентирует студента в системе изучения данной дисциплины. Студенты знакомятся с назначением и задачами курса, его ролью и местом в системе учебных дисциплин и в системе подготовки в целом. На этой лекции рассказываются методические и организационные особенности работы в рамках данной дисциплины, а также дается анализ рекомендуемой для ее освоения учебно-методической литературы.

**Академическая лекция с элементами лекции-беседы** — последовательное изложение материала, осуществляемое преимущественно в виде монолога преподавателя. Элементы лекции-беседы обеспечивают контакт преподавателя с аудиторией, что позволяет привлекать внимание студентов к наиболее важным темам дисциплины, активно вовлекать их в учебный процесс, контролировать темп изложения учебного материала в зависимости от уровня его восприятия.

**Практическое занятие** – занятие, посвященное освоению конкретных умений и навыков по закреплению полученных на лекции знаний.

**Консультации** – вид учебных занятий, являющийся одной из форм контроля самостоятельной работы студентов. На консультациях по просьбе студентов рассматриваются наиболее сложные моменты при освоении материала дисциплины, преподаватель отвечает на вопросы студентов, которые возникают у них в процессе самостоятельной работы.

В процессе обучения используются следующие технологии электронного обучения и дистанционные образовательные технологии:

**Электронный учебный курс «Квантовая механика» в LMS Электронный университет Moodle ЯрГУ**, в котором:

- представлены задания для самостоятельной работы обучающихся по темам дисциплины и рекомендации по их выполнению;
- осуществляется проведение отдельных мероприятий текущего контроля успеваемости студентов;
- представлены тексты лекций по отдельным темам дисциплины;
- представлены правила прохождения промежуточной аттестации по дисциплине;
- представлен список учебной литературы, рекомендуемой для освоения дисциплины;
- представлена информация о форме и времени проведения занятий и консультаций по дисциплине в случае проведения их в дистанционном формате;
- посредством форума осуществляется синхронное и (или) асинхронное взаимодействие между обучающимися и преподавателем в рамках изучения дисциплины.

**6. Перечень лицензионного и (или) свободно распространяемого программного обеспечения, используемого при осуществлении образовательного процесса по дисциплине**

В процессе осуществления образовательного процесса по дисциплине используются:

для формирования материалов для текущего контроля успеваемости и проведения промежуточной аттестации, для формирования методических материалов по дисциплине:

- программы Microsoft Office;
- издательская система LaTex;
- Adobe Acrobat Reader.

Для формирования электронного учебного курса «Квантовая механика» используется система управления электронными курсами LMS Электронный университет Moodle ЯрГУ.

**7. Перечень современных профессиональных баз данных и информационных справочных систем, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (при необходимости)**

В процессе осуществления образовательного процесса по дисциплине используются: Автоматизированная библиотечно-информационная система «БУКИ-NEXT» http://www.lib.uniyar.ac.ru/opac/bk_cat_find.php

**8. Перечень основной и дополнительной учебной литературы, ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» (при необходимости), рекомендуемых для освоения дисциплины**

**а) основная литература**

1. Ефремов Ю.С. Квантовая механика. Москва. Юрайт. 2021 https://urait.ru/viewer/kvantovaya-mehanika-472897#page/1 (электронный ресурс)

**б) дополнительная литература**

1. Блохинцев Д.И. Основы квантовой механики. СПб.: Лань, 2004.

2. Нарынская Е.Н. Методические указания к решению задач по квантовой механике. Учебно-методическое пособие. Ярославль. ЯрГУ, 2019. http://www.lib.uniyar.ac.ru/edocs/iuni/20190705.pdf (электронный ресурс)

3. Поваров А.В. Повышающий и понижающий операторы в квантовой механике. Методические указания. Ярославль. ЯрГУ, 2010. http://www.lib.uniyar.ac.ru/edocs/iuni/20100757.pdf (электронный ресурс)

**9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине**

Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине включает в свой состав специальные помещения:

- учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа;
- учебные аудитории для проведения практических занятий;
- учебные аудитории для проведения групповых и индивидуальных консультаций;
- учебные аудитории для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации;
- помещения для самостоятельной работы;
- помещения для хранения и профилактического обслуживания технических средств обучения.

Специальные помещения укомплектованы средствами обучения, служащими для представления учебной информации большой аудитории.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети «Интернет» и обеспечением доступа к электронной информационно-образовательной среде ЯрГУ.

Автор:

Доцент кафедры
теоретической физики, к.ф.-м.н. Е.Н. Нарынская

*должность, ученая степень* *И.О. Фамилия*

**Приложение № 1 к рабочей программе дисциплины**
**«Квантовая механика»**

**Фонд оценочных средств**
**для проведения текущего контроля успеваемости**
**и промежуточной аттестации студентов**
**по дисциплине**

## 1. Типовые контрольные задания и иные материалы, используемые в процессе текущего контроля успеваемости

### Задания для самостоятельной работы

*(данные задания выполняются студентами самостоятельно и преподавателем в обязательном порядке не проверяются)*

**Задания по теме № 1 «Введение»:**

Раздел 1.4: используя правило квантования Бора-Зоммерфельда, найти:

- уровни энергии частицы массы m с зарядом q, двигающейся в постоянном однородном магнитном поле;
- спектр энергии водородоподобного атома. Рассмотреть случай эллиптических орбит.

**Задания по теме № 2 «Математический аппарат квантовой механики»:**

Раздел 2.1: Найти выражение для операторов координаты $\hat{x}$ и проекции импульса $\hat{p}_x$ в импульсном представлении;

Раздел 2.2: Выполнить задания для самостоятельного решения к главе 2. Операторы в квантовой механике. Алгебра операторов. № 1-9 (стр. 31) из учебно-методического пособия «Методические указания к решению задач по квантовой механике» / Е.Н. Нарынская / ЯрГУ, 2019.
http://www.lib.uniyar.ac.ru/edocs/iuni/20190705.pdf

**Задания по теме № 3 «Приложения квантовой механики»:**

Раздел 3.1: Проверить, что сумма коэффициентов прохождения и отражения равна единице.

**Задания по теме № 5 «Приближенные методы квантовой механики»:**

Раздел 5.4: Найти расщепление спектральных линий водородоподобного атома во внешнем магнитном поле (эффект Зеемана) для случая n=1.

Раздел 5.6: На атом водорода, находящийся при $t \to -\infty$ в основном состоянии, действует однородное электрическое поле, изменяющееся со временем по закону $\vec{E} = \vec{E}_0 e^{-(t/\tau)^2} \cos\omega_0 t$. Рассматривая действие поля на атом как возмущение, определить в первом порядке по теории возмущения вероятность перехода атома в 2p, 2s – состояния под действием указанного поля при $t \to +\infty$.

Раздел 5.7: Выполнить сшивку волновых функций, найденных методом ВКБ, в случае убывающего потенциала.

### Критерии оценивания решения задач заданий для самостоятельной работы и самостоятельных работ №1 и №2

| Показатели | Критерии |
|---|---|
| Понимание | – Краткая запись условия. |

| Показатели | Критерии |
|---|---|
| условия задачи | – Использование физической символики.<br>– Запись единиц измерения и перевод их в СИ<br>– Хорошее оформление работы, четкие рисунки и чертежи.<br>– Нахождение и запись необходимых табличных и дополнительных данных. |
| План решения задачи | – Обоснование выбора физических формул для решения.<br>– Рациональный способ решения<br>– Запись формул |
| Осуществление решения | – Вывод расчетных(ой) формул(ы), решение задачи в общем виде<br>– Математические операции с единицами измерения физических величин, вычисления |
| Правильность решения задачи | – Краткое объяснение решения.<br>– Анализ полученных результатов |

Шкала оценивания:
0 баллов – полное отсутствие критерия;
1 балл – частичное выполнение критерия;
2 балла – полное выполнение критерия

Суммируются баллы за каждую задачу.

Оценка проставляется по количеству набранных баллов:
менее 60% от максимально возможного количества баллов - неудовлетворительно,
60-75% от максимально возможного количества баллов - удовлетворительно,
76-85% от максимально возможного количества баллов - хорошо,
86-100% от максимально возможного количества баллов – отлично.

**Тест для самопроверки**
**по работе с операторами в квантовой механике**
*(тест проводится в ЭУК «Квантовая механика» в LMS Moodle)*

В тесте представлены задания на проверку знаний алгебры операторов, навыков и умений работы с операторами. Тест содержит теоретические и вычислительные вопросы. В тесте 20 вопросов.

Максимальный балл за правильный ответ в зависимости от сложности вопроса составляет от 2 до 4 баллов. Максимальное количество баллов, которое можно получить по итогам теста, составляет 52 балла. На каждый вопрос дается две попытки ответа, в случае правильного ответа со второго раза количество баллов за правильный ответ уменьшается в два раза по сравнению с максимально возможным.

На прохождение теста дается 2 часа.

Итоги прохождения теста оцениваются по следующим правилам:

- количество набранных баллов от 46 до 52 соответствует оценке «отлично»;
- количество набранных баллов от 36 до 45 соответствует оценке «хорошо»;
- количество набранных баллов от 26 до 35 соответствует оценке «удовлетворительно»;
- количество баллов меньше 25 соответствует оценке «неудовлетворительно».

<u>Примерные вопросы теста:</u>

<u>Вопрос 1 Оператор</u> $\hat{A} = x + \partial / \partial x$ <u>является</u>
1) линейным;

2) и линейным, и самосопряженным;
3) не линейным, не самосопряженным.

Вопрос 2 Коммутатор $[\hat{M}^2, \hat{M}_i]$, где i = x, y, z

1) равен нулю при i = x, y, z;
2) не равен нулю при любых i;
3) равен нулю при i = z.

Вопрос 3 Самосопряженность операторов, изображающих физическую величину, является следствием требования

1) сохранением физической величины с течением времени;
2) равенства нулю отклонения от среднего значения физической величины;
3) вещественности среднего значения физической величины;
4) нет правильного ответа.

Вопрос 4 Коммутатор $[x^3, \hat{M}_y]$ равен

1) $-3i\,\hbar\, z\, x^2$;
2) $3i\,\hbar\, z\, x^2$
3) 0.

Вопрос 5 Оператор, эрмитово сопряженный к оператору $\hat{A} = \sin\varphi \cdot \partial / \partial\varphi$ равен

1) $\hat{A}^+ = -\sin\varphi \cdot \partial / \partial\varphi$
2) $\hat{A}^+ = -\cos\varphi$
3) $\hat{A}^+ = -\cos\varphi - \sin\varphi \cdot \partial / \partial\varphi$

Вопрос 6 Два оператора $\hat{A}$ и $\hat{B}$ коммутируют. Это означает, что

1) операторы $\hat{A}$ и $\hat{B}$ – самосопряженные;
2) физические величины, соответствующие операторам $\hat{A}$ и $\hat{B}$ могут быть одновременно измерены;
3) операторы $\hat{A}$ и $\hat{B}$ - вещественные;
4) нет правильного ответа.

Вопрос 7 Оператор $\left(\frac{\partial}{\partial y} y\right)^2$ имеет вид

1) $\frac{\partial^2}{\partial y^2} y^2$
2) 1
3) $1 + 3y\frac{\partial}{\partial y} + y^2 \frac{\partial^2}{\partial y^2}$

Вопрос 8 Если два оператора коммутируют, то они обладают одинаковым набором собственных функций

1) верно
2) неверно

**Правильные ответы**

| **Вопрос №** | Вариант ответа | | **Вопрос №** | Вариант ответа |
|---|---|---|---|---|
| **1** | 1 | | **5** | 3 |
| **2** | 1 | | **6** | 2 |
| **3** | 3 | | **7** | 3 |
| **4** | 2 | | **8** | 1 |

**Самостоятельная работа № 1**

*(проверка сформированности ОПК-1, индикатор ИД-ОПК-1_2*
*(в части умений работы с операторами))*

**Примеры заданий:**

**Вариант 1**

1. Раскрыть скобки в операторном выражении:

$$\left(\frac{\partial}{\partial x}-\frac{1}{x}\right)^2$$

2. Вычислить следующие коммутаторы:

$$\left[\frac{\partial}{\partial x}, 6x^5\right], \quad \left[\vec{\nabla}, r^2\right], \quad \left[y^2, \hat{M}_z\right]$$

3. Найти оператор, эрмитово-сопряженный оператору $\hat{A}=\dfrac{\partial^2}{\partial\varphi^2}$

**Вариант 2**

1. Раскрыть скобки в операторном выражении:

$$\left(\frac{\partial}{\partial y}\, y\right)^2$$

2. Вычислить следующие коммутаторы:

$$\left[\frac{\partial}{\partial\theta}, \cos\theta\,\sin\varphi\right], \quad \left[\vec{\nabla}, (\vec{r}\cdot\vec{a})\,\vec{r}\right], \quad \left[\hat{p}_y, \hat{M}_x\right]$$

3. Найти оператор, эрмитово-сопряженный оператору $\hat{A}=i\,\dfrac{\partial^2}{\partial y^2}$

<u>Правила выставления оценки по результатам самостоятельной работы:</u>

Оценка по результатам самостоятельной работы считается в баллах по следующему принципу: правильно выполненное
- задание № 1 – 2 балла;
- задание № 2 – 1 коммутатор –1 балл, 2 коммутатор – 3 балла, 3 коммутатор – 2 балла;
- задание № 3 – 2 балла.

Каждое из заданий может быть оценено половиной заявленных по нему баллов, в случае, когда при его выполнении правильно применено определение оператора (коммутатора и т.д.), правильно использованы свойства операторов (коммутаторов и т.д.), но имеются ошибки в численных расчетах.

Полностью неправильно выполненное задание – 0 баллов.

Максимальное количество баллов по итогам самостоятельной работы – 10 баллов,

Набранное количество баллов - 9-10 соответствует оценке «отлично», 7-8 баллов – оценке «хорошо», 5-6 баллов – оценке «удовлетворительно», менее 5 баллов – оценке «неудовлетворительно» (умения на данном этапе освоения дисциплины не сформированы).

**Тест для самопроверки по результатам освоения дисциплины перед экзаменом**
***(тест проводится в ЭУК «Квантовая механика» в LMS Moodle)***

В тесте 55 вопросов, за правильный ответ на каждый вопрос дается 1 балл. На каждый вопрос дается одна попытка ответа. На прохождение теста дается время 2 часа.

Количество набранных баллов от 51 до 55 соответствует оценке «отлично».

Количество набранных баллов от 41 до 50 соответствует оценке «хорошо».

Количество набранных баллов от 31 до 40 соответствует оценке «Удовлетворительно».

Количество баллов меньше 31 соответствует оценке «Неудовлетворительно».

## 2. Список вопросов и (или) заданий для проведения промежуточной аттестации

### Экзаменационные задачи

**<u>Примеры заданий:</u>**

**Вариант 1**

1. Вычислить следующие коммутаторы:

$$\left[\frac{\partial}{\partial y}, 3yx^5\right] - 1\,\textit{балл}, \quad \left[\vec{\nabla}, \vec{r}^{\,2}\right] - 3\,\textit{балла}, \quad \left[z^2, \hat{M}_x\right] - 2\,\textit{балла}$$

2. Найти оператор, эрмитово-сопряженный оператору

$$\hat{A} = i\, y \frac{\partial}{\partial y} \quad - \; 2\,\textit{балла}$$

3. Найти нормировочный коэффициент функции

$$\psi(\theta,\varphi) = N \sin\theta\, e^{i\varphi}, \quad 0 < \varphi < 2\pi, 0 < \theta < \pi \quad - 3\,\textit{балла}$$

4. Найти сферическую функцию $Y_{2,-1}(\theta,\varphi)$, используя следующее определение:

$$Y_{lm}(\theta,\varphi) = N\, e^{im\varphi} \sin^{|m|}\theta \frac{d^{|m|} P_l(\cos\theta)}{d\cos\theta^{|m|}},$$

$$\text{где } P_l(x) = \frac{1}{2^l\, l!} \frac{d^l}{dx^l}(x^2 - 1)^l$$

и отнормировать ее – *4 балла*.

## Вариант 2

1. Вычислить следующие коммутаторы:

$$\left[\frac{\partial}{\partial z}, 3z^2 + x^2\right] - 1\,\textit{балл}, \quad \left[\vec{\nabla}, (\vec{a}\cdot\vec{r})^2\right] - 3\,\textit{балла}, \quad \left[p_z{}^2, \hat{M}_x\right] - 2\,\textit{балла}$$

2. Найти оператор, эрмитово-сопряженный оператору

$$\hat{A} = i\frac{\partial}{\partial\varphi}\cos\varphi \quad - \; 2\,\textit{балла}$$

3. Найти нормировочный коэффициент функции

$$\psi(r) = N\, r^2\, e^{-r/2}, \quad 0 < r < \infty - 3\,\textit{балла}$$

4. Найти сферическую функцию $Y_{2,0}(\theta,\varphi)$, используя следующее определение:

$$Y_{lm}(\theta,\varphi) = N\, e^{im\varphi}\, \sin^{|m|}\theta\, \frac{d^{|m|}\, P_l(\cos\theta)}{d\cos\theta^{|m|}},$$

$$\text{где } P_l(x) = \frac{1}{2^l\, l!}\frac{d^l}{dx^l}(x^2-1)^l$$

и отнормировать ее – *4 балла*.

<u>Правила выставления оценки экзаменационных задач:</u>

Оценка по результатам контрольной работы определяется в баллах по следующему принципу: правильно выполненное задание оценивается в максимальное количество баллов, указанное по данному заданию в варианте.

Каждое из заданий может быть оценено половиной заявленных по нему баллов, в случае, когда при его выполнении правильно применено определение оператора (коммутатора и т.д.), правильно использованы свойства операторов (коммутаторов и т.д.), но имеются ошибки в численных расчетах.

Полностью неправильно выполненное задание - 0 баллов.

## Список вопросов к экзамену:

1. Место квантовой механики в физике. Экспериментальные данные, приведшие к созданию квантовой механики.
2. Гипотеза де Бройля. Волны де Бройля. Корпускулярно-волновой дуализм. Волновая функция. Принцип суперпозиции. Разложение волновой функции по плоским волнам де Бройля. Волновые пакеты.
3. Статистическая интерпретация волновой функции по Борну. Волновая функция в координатном и импульсном представлениях.
4. Описание физических величин операторами. Общие свойства операторов, алгебра операторов. Операторы координаты и импульса в координатном и импульсном представлениях. Оператор момента импульса. Операторы кинетической и потенциальной энергии, гамильтониан.
5. Понятие оператора, эрмитово-сопряженного к данному. Самосопряженные операторы. Вещественность средних значений физических величин.
6. Операторы отклонения от среднего и среднеквадратичного отклонения. Собственные значения и собственные функции эрмитовых операторов. Дискретный и непрерывный спектры. Примеры нахождения собственных значений операторов $P_x$ и $M_z$.

7. Свойства собственных функций дискретного и непрерывного спектров. Условие ортонормированности.
8. Условие возможности одновременного точного измерения нескольких физических величин в одном состоянии системы. Определение волновой функции (состояния) микрообъекта полным набором независимых физических величин, характеризующих внешние условия.
9. Соотношение неопределенности для физических величин. Вывод соотношения неопределенности из аппарата квантовой механики.
10. Стационарное и нестационарное уравнения Шредингера. Вид волновой функции для стационарной задачи.
11. Сохранение нормировки волновой функции. Плотность тока вероятности. Уравнение непрерывности.
12. Гармонический осциллятор. Спектр энергии и волновые функции.
13. Движение в кулоновском поле. Водородоподобные атомы. Спектр энергии и волновые функции.
14. Изменение средних значений физических величин с течением времени. Оператор производной по времени от физической величины. Операторы скорости, ускорения, силы. Теорема Эренфеста.
15. Спин электрона. Экспериментальное обоснование существования собственного момента импульса электрона. Уравнение Шредингера для электрона в электромагнитном поле с учетом спина (уравнение Паули).
16. Оператор спина. Матрицы Паули. Свойства матриц Паули. Собственные функции и собственные значения оператора проекции спина на произвольное направление.
17. Уравнение Шредингера в произвольном электромагнитном поле. Калибровочная инвариантность в квантовой механике.
18. Метод теории возмущений в стационарных задачах с дискретным спектром без вырождения.
19. Метод теории возмущений в стационарных задачах с дискретным спектром при наличии вырождения.
20. Расщепление спектральных линий водородоподобного атома в электрическом поле. Эффект Штарка.
21. Расщепление спектральных линий водородоподобного атома в магнитном поле. Эффект Зеемана.
22. Учет влияния размеров ядра на спектр водородоподобного атома.
23. Нестационарная теория возмущений. Теория квантовых переходов под влиянием возмущения, зависящего от времени.
24. Переход от квантовой механики к классической. Квазиклассическое приближение в квантовой механике.
25. Метод Вентцеля-Крамерса-Брилюэна. Волновая функция в ВКБ приближении.
26. Волновая функция в ВКБ приближении. Сшивание волновой функции в ВКБ приближении.
27. Система многих частиц в квантовой механике. Учет движения ядра.
28. Уравнение Шредингера для системы, состоящей из одинаковых частиц. Симметричные и антисимметричные волновые функции. Принцип Паули.

**Критерии оценивания ответов на вопросы билета**

| **Критерий** | **Пороговый уровень (на «удовлетворительно»)** | **Продвинутый уровень (на «хорошо»)** | **Высокий уровень (на «отлично»)** |
|---|---|---|---|
| **Соответствие ответа** | Хотя бы частичное (*не относящееся к вопросу не подлежит проверке*) | Полное | Полное |

| | | | |
|---|---|---|---|
| **вопросу** | | | |
| **Наличие примеров** | Имеются отдельные примеры | Много примеров | Есть практически ко всем утверждениям |
| **Содержание ответа** | Понятийные вопросы изложены с классификациями, проблемные с постановкой проблемы и изложением различных точек зрения. Имеются ошибки или пробелы. | Ответ почти полный, без ошибок, не хватает отдельных элементов и тонкостей | Исчерпывающ ий полный ответ |

## 3. Описание процедуры выставления оценки на экзамене

В экзаменационные билет включается два теоретических вопроса и задачи. На подготовку к ответу дается не менее 1часа.

По итогам экзамена выставляется одна из оценок: «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» или «неудовлетворительно».

**Оценка «Отлично»** выставляется студенту, который демонстрирует глубокое и полное владение содержанием материала и понятийным аппаратом квантовой механики; осуществляет межпредметные связи; умеет связывать теорию с практикой. Студент дает развернутые, полные и четкие ответы на вопросы экзаменационного билета и дополнительные вопросы, соблюдает логическую последовательность при изложении материала. Грамотно использует терминологию квантовой механики

**Оценка «Хорошо»** выставляется студенту, ответ которого на экзамене в целом соответствуют указанным выше критериям, но отличается меньшей обстоятельностью, глубиной, обоснованностью и полнотой. В ответе имеют место отдельные неточности (несущественные ошибки), которые исправляются самим студентом после дополнительных и (или) уточняющих вопросов экзаменатора.

**Оценка «Удовлетворительно»** выставляется студенту, который дает недостаточно полные и последовательные ответы на вопросы экзаменационного билета и дополнительные вопросы, но при этом демонстрирует умение выделить существенные и несущественные признаки и установить причинно-следственные связи. Ответы излагается в терминах квантовой механики, но при этом допускаются ошибки в определении и раскрытии некоторых основных понятий, формулировке положений, которые студент затрудняется исправить самостоятельно. При аргументации ответа студент не обосновывает свои суждения. На часть дополнительных вопросов студент затрудняется дать ответ или дает неверные ответы.

**Оценка «Неудовлетворительно»** выставляется студенту, который демонстрирует разрозненные, бессистемные знания; беспорядочно и неуверенно излагает материал; не умеет выделять главное и второстепенное, не умеет соединять теоретические положения с практикой, не устанавливает межпредметные связи; допускает грубые ошибки при определении сущности раскрываемых понятий, явлений, вследствие непонимания их существенных и несущественных признаков и связей; дает неполные ответы, логика и последовательность изложения которых имеют существенные и принципиальные нарушения, в ответах отсутствуют выводы. Дополнительные и уточняющие вопросы экзаменатора не приводят к коррекции ответов студента. На основную часть дополнительных вопросов студент затрудняется дать ответ или дает неверные ответы.

Оценка «Неудовлетворительно» выставляется также студенту, который взял экзаменационный билет, но отвечать отказался.

**Приложение № 2 к рабочей программе дисциплины**
**«Квантовая механика»**

## Методические указания для студентов по освоению дисциплины

Основной формой изложения учебного материала по дисциплине «Квантовая механика» являются лекции, причем в достаточно большом объеме. Это связано с тем, что в основе квантовой механики лежит особый математический аппарат, с помощью которого квантовая механика решает довольно сложные и громоздкие задачи. По большинству тем предусмотрены практические занятия, на которых происходит закрепление лекционного материала путем применения его к конкретным физическим задачам и отработка навыков работы с математическим аппаратом квантовой механики.

Для успешного освоения дисциплины очень важно решение достаточно большого количества задач, как в аудитории, так и самостоятельно в качестве домашних заданий. Примеры решения задач разбираются на лекциях и практических занятиях, при необходимости по наиболее трудным темам проводятся дополнительные консультации. Основная цель решения задач – помочь усвоить фундаментальные понятия и основы квантовой механики.

Задания для самостоятельного решения формулируются на лекциях и практических занятиях. В качестве заданий для самостоятельной работы дома студентам предлагаются задачи, аналогичные разобранным на лекциях и практических занятиях или немного более сложные, которые являются результатом объединения нескольких базовых задач. Полный список заданий для самостоятельной работы по темам (разделам) дисциплины приведен в ЭУК в LMS Moodle «Квантовая механика». Вопросы, возникающие в процессе или по итогам решения этих задач, можно задать на консультациях или в форуме (чате) в ЭУК в LMS Moodle.

Для самостоятельной работы, в том числе и повтора разобранного лекции и практических занятиях материала первого семестра изучения дисциплины рекомендуется использовать учебно-методическое пособие «Методические указания к решению задач по квантовой механике» (автор Е.Н. Нарынская), 2019 год издания. Данное пособие состоит из четырех разделов, в которых рассматриваются задачи на использование основных понятий аппарата квантовой механики. Материал каждого раздела включает в себя краткое изложение теоретического материала по заданной теме, который затем иллюстрируется подробным решением типичных задач. В заключение каждого раздела приводятся задания для самостоятельного решения, ответы к этим заданиям и указания по их решению приведены в конце данного учебно-методического пособия.

В конце первого семестра изучения дисциплины студенты сдают зачет, в конце всего курса – экзамен. Зачет по итогам первого семестра выставляется по итогам контрольной работы. На зачете проверяются умения и навыки студентов в работе с основными понятиями квантовой механики, являющимися основной для построения всего математического аппарата квантовой механики - волновыми функциями и операторами квантовой механики.

В конце второго семестра изучения дисциплины студенты сдают экзамен. Экзамен принимается по экзаменационным билетам, каждый из которых включает в себя два теоретических вопроса. На самостоятельную подготовку к экзамену выделяется 3 дня, в это время предусмотрена и групповая консультация.