

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Направление подготовки/специальность: 14.03.01 Ядерная энергетика и теплофизика

Наименование образовательной программы: Теплофизика

Уровень образования: высшее образование - бакалавриат

Форма обучения: Очная

Рабочая программа дисциплины
КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА

Блок:	Блок 1 «Дисциплины (модули)»
Часть образовательной программы:	Часть, формируемая участниками образовательных отношений
№ дисциплины по учебному плану:	Б1.Ч.04
Трудоемкость в зачетных единицах:	5 семестр - 5;
Часов (всего) по учебному плану:	180 часов
Лекции	5 семестр - 32 часа;
Практические занятия	5 семестр - 48 часа;
Лабораторные работы	не предусмотрено учебным планом
Консультации	5 семестр - 2 часа;
Самостоятельная работа	5 семестр - 97,5 часа;
в том числе на КП/КР	не предусмотрено учебным планом
Иная контактная работа	проводится в рамках часов аудиторных занятий
включая:	
Контрольная работа	
Промежуточная аттестация:	
Экзамен	5 семестр - 0,5 часа;

Москва 2023

ПРОГРАММУ СОСТАВИЛ:

Преподаватель

(должность)

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Бобров В.Б.
	Идентификатор	R84cde94f-BobrovVB-6549f943

(подпись)

В.Б. Бобров

(расшифровка
подписи)

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель
образовательной программы

(должность, ученая степень, ученое звание)

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Яньков Г.Г.
	Идентификатор	Rbb1f0c84-YankovGG-11a2e4dc

(подпись)

Г.Г. Яньков

(расшифровка подписи)

Заведующий выпускающей
кафедры

(должность, ученая степень, ученое звание)

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Герасимов Д.Н.
	Идентификатор	Ra5495398-GerasimovDN-6b58615

(подпись)

Д.Н. Герасимов

(расшифровка подписи)

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Цель освоения дисциплины: Целью освоения дисциплины является изучение основ квантовой механики как базы для последующего освоения статистической физики, теории теплофизических свойств веществ, физики плазмы, физики твёрдого тела и применения полученных знаний в практике теплофизических исследований.

Задачи дисциплины

- Освоение представлений о причинах, научных, технологических и мировоззренческих последствиях революции в физике XX века, приведших к созданию квантовой физики;
- Владение основными идеями и положениями, лежащими в основе классической и квантовой физики;
- Владение навыками применения математического аппарата, методами решения задач квантовой механики и анализу их результатов;
- Освоение представлений о применении методов квантовой механики в теплофизике.

Формируемые у обучающегося **компетенции** и запланированные **результаты обучения** по дисциплине, соотнесенные с **индикаторами достижения компетенций**:

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенции	Запланированные результаты обучения
ПК-3 Способен проводить расчеты теплофизических характеристик процессов, протекающих в конкретных технических устройствах и аппаратах энергетического оборудования	ИД-2ПК-3 Владеет навыками расчета теплофизических свойств рабочих тел, используемых в энергетическом оборудовании	знать: - Основные принципы и теоретический аппарат классической и квантовой физики; - Основные экспериментальные факты, необъяснимые с позиций классической физики и приведшие к созданию квантовой физики; - Методы описания стационарных связанных состояний и состояний рассеяния одной микрочастицы во внешнем силовом поле, а также системы двух взаимодействующих микрочастиц. уметь: - Оценивать степень влияния квантовых эффектов на теплофизические свойства веществ и протекание теплофизических процессов; - Вычислять энергетические и другие физические характеристики микрочастиц вещества, используя уравнение Шредингера..

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ ВО

Дисциплина относится к основной профессиональной образовательной программе Теплофизика (далее – ОПОП), направления подготовки 14.03.01 Ядерная энергетика и теплофизика, уровень образования: высшее образование - бакалавриат.

Требования к входным знаниям и умениям:

- знать По высшей математике – Теорию комплексных чисел; – Линейную алгебру и основы теории линейных пространств, в том числе комплексных; – Теорию пределов; – Дифференциальное и интегральное исчисление; – Теорию рядов; – Обыкновенные линейные дифференциальные уравнения и простейшие методы их решения (в частности, метод разложения решения в ряд); – Линейные дифференциальные уравнения с частными производными и простейшие методы их решения (в частности, метод разделения переменных); – Векторный анализ (дифференциальные операторы, интегралы по контуру, поверхности и объёму); – Основы теории линейных функциональных пространств, в том числе комплексных; – Элементы теории обобщённых функций (дельта-функция Дирака); – Элементы теории операторов в линейных функциональных пространствах По физике – Законы классической механики и их математическую формулировку (в виде дифференциальных уравнений); – Динамические переменные (скорость, импульс, кинетическая энергия, момент импульса материальной точки, системы материальных точек, центра масс системы, потенциальная энергия системы в поле внешних сил, потенциальная энергия взаимодействия материальных точек); – Законы сохранения динамических переменных, интегралы движения; – Основы молекулярной физики и теории теплоты (тепловое движение молекул, температура, давление как средние значения соответствующих динамических переменных молекул по тепловому движению, закон равномерного распределения энергии по степеням свободы молекул, элементарная теория теплоёмкости идеальных газов и твёрдых тел); – Основы теории электричества и электромагнитного поля; – Основы теории распространения электромагнитных волн и физической оптики.

- уметь По высшей математике – выполнять вычисления с комплексными числами; – решать алгебраические уравнения, используя аналитические и графоаналитические методы; – решать неоднородные и однородные системы линейных алгебраических уравнений; – вычислять производные от простейших функций одной и нескольких переменных; – разлагать функции в степенные и функциональные ряды; – раскрывать неопределённости при вычислении пределов; – строить графики функций, используя их особые точки (корни, экстремумы, точки перегиба) и асимптоты; – вычислять неопределённые и определённые, а также несобственные интегралы от простейших функций одной и нескольких переменных; – выполнять алгебраические операции с векторами (сложения, скалярного и векторного умножения); – вычислять результаты воздействия дифференциальных операторов (градиента, дивергенции, ротора) на скалярные и векторные функции координат. По физике применять дифференциальные уравнения движения материальных точек для расчёта их траекторий; – выполнять для описания движения систем материальных точек переход от декартовых координат к координатам центра масс и относительного движения (в частности, в задаче о движении двух взаимодействующих материальных точек); – применять для решения уравнений движения законы сохранения импульса, момента импульса, энергии; – использовать закон равномерного распределения энергии по степеням свободы молекул для анализа экспериментальных данных о термодинамическом поведении веществ; – использовать законы электростатики для описания взаимодействия между заряженными микрочастицами (электронами, атомными ядрами); – применять теорию электромагнитных волн для вывода соотношений между частотой, длиной волны и скоростью распространения плоской монохроматической волны.

Результаты обучения, полученные при освоении дисциплины, необходимы при выполнении выпускной квалификационной работы.

3. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

3.1 Структура дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет 5 зачетных единиц, 180 часов.

№ п/п	Разделы/темы дисциплины/формы промежуточной аттестации	Всего часов на раздел	Семестр	Распределение трудоемкости раздела (в часах) по видам учебной работы										Содержание самостоятельной работы/ методические указания	
				Контактная работа							СР				
				Лек	Лаб	Пр	Консультация		ИКР		ПА	Работа в семестре	Подготовка к аттестации /контроль		
КПР	ГК	ИККП	ТК												
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
1	Квантовая физика — революция в естествознании	56	5	16	-	20	-	-	-	-	-	20	-	<p><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u> Самостоятельное изучение теоретического материала [1], стр. 9–33, [2], стр. 11–26, 40–46, [3], стр. 13–37, Литература 1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: В 10 т. Т.1: Механика. – М.: Физматлит, 2001, 2012. – 224 с. 2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: В 10 т. Т.2: Теория поля. – М.: Физматлит, 2001, 2012. – 536 с. 3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: В 10 т. Т.3: Квантовая механика (нерелятивистская теория). – М.: Физматлит, 2001, 2002. – 808 с.</p> <p><u>Подготовка к практическим занятиям:</u> Подготовка ответов на вопросы: - Дайте сравнительную характеристику вещества и поля в классической картине мира. - Вспомните изучавшиеся в курсе общей физики закономерности, которые описывают сосуществование вещества и электромагнитного поля. - Какие результаты измерений характеристик излучения абсолютно чёрного тела и нагретых газов классическая физика не может объяснить? - Какие результаты измерений характеристик фотоэффекта классическая физика не может объяснить? - Какие результаты измерений</p>	
1.1	Основы классической физики	28		8	-	10	-	-	-	-	-	-	10		-
1.2	Физические основания квантовой механики	28		8	-	10	-	-	-	-	-	-	10		-

													<p>теплоёмкости твёрдого тела и газов классическая физика не может объяснить? - Почему с точки зрения классической физики вещество неустойчиво? - Как, зная потенциальную энергию материальной точки во внешнем поле, подсчитать действующую на неё силу? - Почему нельзя определить потенциальную энергию силы Лоренца, которая действует на заряженную материальную точку, движущуюся в магнитном поле? - Запишите потенциальную энергию системы материальных точек в виде суммы потенциальной энергии системы во внешнем силовом поле и потенциальной энергии взаимодействия частиц между собой. В чём принципиальное различие зависимости этих двух вкладов от координат частиц? - Напишите уравнения движения двух взаимодействующих заряженных частиц. - Докажите, что энергия системы любого количества взаимодействующих материальных точек в отсутствии внешних сил является интегралом движения. - Оцените отношение сил тяготения и электростатического взаимодействия двух электронов. - Какие длины волн и частоты электромагнитного поля соответствуют радиоволнам в FM-диапазоне, инфракрасному излучению, свету в видимом диапазоне, ультрафиолетовому свету, гамма-излучению? - Кого из выдающихся физиков XX века, внесших крупный вклад в создание квантовой физики, вы знаете? - Связаны ли, на ваш взгляд, длина де Бройля микрообъекта и неопределённость его положения в пространстве? - Что можно утверждать о вероятности локализации микрообъекта в пространственной области, размер которой порядка или меньше его длины волны Де Бройля? - Не опровергает</p>
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	---

													ли основные принципы квантовой физики реальная возможность наблюдать объекты размером в несколько нанометров (т.е. содержащие порядка десятков атомов) и манипулировать ими с помощью сканирующего туннельного микроскопа? - Какое наиболее важное изменение в картине мира произошло в результате создания квантовой физики? - Прокомментируйте эксперимент по измерению положения и скорости микрообъекта в одном опыте с позиций принципа дополнительности. <u>Изучение материалов литературных источников:</u> [5], 1-108
2	Уравнение Шрёдингера	12	2	-	4	-	-	-	-	-	6	-	<u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u>
2.1	Уравнение Шрёдингера для микрочастиц	12	2	-	4	-	-	-	-	-	6	-	Самостоятельное изучение теоретического материала [1], стр. 70–90, [2], стр. 6–14 Литература 1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: В 10 т. Т.3: Квантовая механика (нерелятивистская теория). – М.: Физматлит, 2001, 2002. – 808 с. 2. Бобров В.Б. Основные положения нерелятивистской квантовой механики. – М.: Изд-во МЭИ, 2019. – 108 с. <u>Подготовка к практическим занятиям:</u> Подготовка ответов на вопросы и к решению задач: - Записать уравнение Шредингера для волновой функции микрочастицы, имеющей одну степень свободы и находящейся во внешнем поле. Сформулировать начальные и граничные условия для волновой функции. - Записать уравнение Шредингера для системы, состоящей из N взаимодействующих частиц, находящихся во внешнем поле, с использованием оператора Гамильтона. Записать явный вид оператора Гамильтона для такой системы. - Является

													<p>связанных состояниях в поле силы гармонического осциллятора. - Вычислить волновые функции и энергетические уровни микрочастицы массы m, находящейся в стационарных связанных состояниях в в бесконечно глубокой потенциальной трехмерной "яме". - Вычислите коэффициент отражения микрочастицы массы m от потенциального барьера и коэффициент прохождения сквозь барьер (коэффициент прозрачности) для заданного одномерного потенциального барьера прямоугольной формы. Принять, что частица «падает» на барьер слева направо, - Чем отличаются стационарные связанные состояния и стационарные состояния рассеяния? Сформулировать основные особенности связанных состояний и состояний рассеяния. Какие эффекты, необъяснимые с позиций классической физики, имеют место при решении задач о стационарных связанных состояниях и стационарных состояниях рассеяния?</p> <p><u>Изучение материалов литературных источников:</u></p> <p>[3], 71-109 [5], 1-108 [6], 71-109</p>
3	Операторы импульса, координаты и энергии микрочастицы	20	4	-	6	-	-	-	-	-	10	-	<p><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></p> <p>Самостоятельное изучение теоретического материала [1], стр. 42–66, [2], стр. 6-14 Литература 1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: В 10 т. Т.3: Квантовая механика (нерелятивистская теория). – М.: Физматлит, 2001, 2002. – 808 с. 2. Бобров В.Б. Основные положения нерелятивистской квантовой механики. – М.: Изд-во МЭИ, 2019. – 108 с.</p>
3.1	Операторы импульса, координаты и энергии в квантовой механике	20	4	-	6	-	-	-	-	-	10	-	

														<p><u>Подготовка к практическим занятиям:</u> Подготовка ответов на вопросы и к решению задач: - Дать определение понятиям «оператор, собственная функция и собственное значение оператора». Что означает выражение «собственная функция, отвечающая собственному значению»? - Какой математический объект отображает понятие динамической переменной (динамической функции) в квантовой механике? Каков физический смысл собственных функций и собственных значений оператора, представляющего некоторую динамическую переменную в квантовой механике? - Сформулировать требования, предъявляемые к собственной функции оператора импульса свободной микрочастицы. В чем состоит принцип соответствия Бора и как этот принцип используется при построении оператора импульса? Записать оператор импульса и его собственную функцию для одномерного случая. - Используя метод разделения пространственных переменных для решения уравнения Шредингера для свободной микрочастицы с тремя степенями свободы, определить оператор импульса и его собственную функцию для трехмерного случая. - Дать определение одномерной дельта - функции Дирака и сформулировать ее свойства. Построить обобщение этой функции на трехмерный случай. - Записать уравнение на собственные значения и собственные функции оператора координаты. Как воздействует оператор координаты на произвольную волновую функцию и на свою собственную функцию? Записать общую собственную функцию операторов трех декартовых проекций пространственной переменной</p>
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

														микрочастицы. - Использовать принцип соответствия Бора для определения оператора Гамильтона. Записать операторы кинетической и потенциальной энергии для одной микрочастицы и системы взаимодействующих микрочастиц. Записать уравнение Шредингера и стационарное уравнение Шредингера, используя оператор Гамильтона. <u>Изучение материалов литературных источников:</u> [5], 1-108
4	Статистические характеристики динамических переменных	12	2	-	4	-	-	-	-	-	6	-	<u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u> Самостоятельное изучение теоретического материала [1], стр. 21-37, 49–61, [2], стр. 70–105 Литература 1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: В 10 т. Т.3: Квантовая механика (нерелятивистская теория). – М.: Физматлит, 2001, 2002. – 808 с. 2. Бобров В.Б. Основные положения нерелятивистской квантовой механики. – М.: Изд-во МЭИ, 2019. – 108 с.	
4.1	Динамические переменные в квантовой механике	12	2	-	4	-	-	-	-	-	6	-	<u>Подготовка к практическим занятиям:</u> Подготовка ответов на вопросы и к решению задач: - Дать определение понятиям «функциональное пространство, скалярное произведение функций и ортогональность функций в функциональном пространстве». Зависит ли скалярное произведение функций от порядка сомножителей? - Чему равна вероятность перехода между состояниями системы, если описывающие их волновые функции ортогональны? Вывести соотношение, выражающее принцип микроскопической обратимости. - Дать определение понятиям «сопряженный и самосопряженный оператор». Построить оператор, сопряженный оператору	

													<p>дифференцирования. Доказать, что квадрат любого самосопряженного оператора также является самосопряженным. - Доказать, что операторы импульса, координаты и оператор Гамильтона являются самосопряженными. - Доказать, что любое собственное значение самосопряженного оператора является действительным числом, а любые собственные функции самосопряженного оператора, отвечающие различным собственным значениям, ортогональны. Почему динамические переменные в квантовой механике представляются только самосопряженными операторами? - Что означает понятие «полная система собственных функций»? Выполнить разложение произвольной волновой функции по некоторому полному набору функций и установить, чему равны коэффициенты в таком разложении. Чему равна сумма квадратов модулей таких коэффициентов? - С использованием понятия вероятности того, что динамическая переменная может принимать одно из возможных дискретных значений, записать среднее (ожидаемое) значение динамической переменной в квантовой механике? Как связана вероятность того или иного результата измерения динамической переменной в состоянии, описываемом некоторой волновой функцией, с коэффициентами разложения этой функции в ряд по собственным функциям оператора, который представляет данную динамическую переменную и обладает дискретным спектром собственных значений? - С использованием понятия плотности вероятности того, что динамическая переменная может принимать одно из возможных непрерывных значений,</p>
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

													записать среднее (ожидаемое) значение динамической переменной в квантовой механике? Как связана плотность вероятности того или иного результата измерения динамической переменной в состоянии, описываемом некоторой волновой функцией, с коэффициентами разложения этой функции в интеграл по собственным функциям оператора, который представляет данную динамическую переменную и обладает непрерывным спектром собственных значений? - Вычислить среднее (ожидаемое) значение координаты и импульса микрочастицы с одной степенью свободы, находящейся в стационарном состоянии в поле, задаваемом как «потенциальная яма со стенками бесконечной высоты». - Доказать первую и вторую теоремы Эренфеста для микрочастицы с одной степенью свободы. Каков физический смысл теорем Эренфеста? <u>Изучение материалов литературных источников:</u> [5], 1-108
5	Соотношения неопределённости	12	2	-	4	-	-	-	-	-	6	-	<u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u>
5.1	Соотношения неопределённости в квантовой механике	12	2	-	4	-	-	-	-	-	6	-	Самостоятельное изучение теоретического материала [1], стр. 66–69, [2], стр. 6–14 Литература 1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: В 10 т. Т.3: Квантовая механика (нерелятивистская теория). – М.: Физматлит, 2001, 2002. – 808 с. 2. Бобров В.Б. Основные положения нерелятивистской квантовой механики. – М.: Изд-во МЭИ, 2019. – 108 с. <u>Подготовка к практическим занятиям:</u> Подготовка ответов на вопросы и к решению задач: - Сформулировать основные правила алгебры операторов. Можно ли построить

															<p>оператор, который бы являлся дробной степенью исходного оператора?</p> <p>Сформулировать условия равенства двух операторов. - Найти коммутатор операторов координаты и кинетической энергии микрочастицы с одной степенью свободы. - Найти коммутатор операторов импульса и потенциальной энергии микрочастицы с одной степенью свободы. - Вывести коммутационное соотношение между операторами импульса и Гамильтона для для микрочастицы с одной степенью свободы. - Вывести коммутационное соотношение между операторами координаты и Гамильтона для микрочастицы с одной степенью свободы. - Вывести правило вычисления оператора, сопряженного произведению операторов. Является ли коммутатор самосопряженных операторов также самосопряженным оператором? Является ли оператор кинетической энергии микрочастицы положительно определенным? - Вывести неравенство Гейзенберга. На этой основе доказать соотношение неопределенностей между координатой и импульсом микрочастицы с одной степенью свободы. - Вывести соотношение неопределенностей между операторами координаты и кинетической энергии, а также между импульсом и потенциальной энергией микрочастицы с одной степенью свободы. - Сформулировать прямую и обратную теоремы об общих собственных функциях коммутирующих операторов. Всегда ли динамические переменные, операторы которых коммутируют, имеют одновременно определенные значения. Могут ли иметь одновременно определенные значения динамические переменные, операторы</p>
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

														<p>которых не коммутируют? - Записать динамическое уравнение Гейзенберга для оператора, зависящего от времени. Используя динамическое уравнение Гейзенберга и коммутационные соотношения между операторами координаты и Гамильтона и между операторами импульса и Гамильтона для для микрочастицы с одной степенью свободы, вывести теоремы Эренфеста для микрочастицы с одной степенью свободы и массой m.</p> <p><u>Изучение материалов литературных источников:</u> [5], 1-108</p>
6	Микрочастица в поле центральной силы	12	2	-	4	-	-	-	-	-	6	-	<p><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></p>	
6.1	Поведение микрочастицы в центральном поле	12	2	-	4	-	-	-	-	-	6	-	<p>Самостоятельное изучение теоретического материала [1], стр. 107–141, [2], стр. 15–27 Литература 1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: В 10 т. Т.3: Квантовая механика (нерелятивистская теория). – М.: Физматлит, 2001, 2002. – 808 с. 2. Бобров В.Б. Основные положения нерелятивистской квантовой механики. – М.: Изд-во МЭИ, 2019. – 108 с.</p> <p><u>Подготовка к практическим занятиям:</u> Подготовка ответов на вопросы и к решению задач: - Записать определение момента импульса для микрочастицы в классической механике. Доказать закон сохранения момента импульса для классической микрочастицы в поле центральной внешней силы. - Записать определение момента импульса для микрочастицы в квантовой механике. Доказать, что операторы проекций момента импульса являются самосопряженными. - Используя определения операторов проекций момента</p>	

														импульса, вычислить коммутаторы операторов различных проекций момента импульса. - Что следует из того факта, что операторы проекций момента импульса микрочастицы не коммутируют друг с другом? - Используя определения операторов проекций момента импульса и квадрата момента импульса, вычислить коммутаторы операторов различных проекций момента импульса. - Что следует из того факта, что операторы проекций момента импульса микрочастицы коммутируют с оператором квадрата момента импульса? - Как корректно сформулировать закон сохранения момента импульса микрочастицы с учетом требований квантовой механики? Остается ли справедливым с учетом требований квантовой механики закон сохранения энергии микрочастицы в поле центральной силы? - Как получить выражения для операторов квадрата момента импульса и его проекций в сферических координатах? Записать соответствующие выражения. - Какие динамические переменные одновременно имеют определенные значения, т.е. являются интегралами движения в задаче о стационарных состояниях микрочастицы в поле центральной силы? - Методом разделения переменных показать, как задачу об определении стационарных состояний микрочастицы в поле центральной силы свести к системе уравнений для радиальных и угловых волновых функций. - Для каких операторов угловые волновые функции являются собственными функциями? Записать «угловые» уравнения с использованием операторов момента импульса. - Буквально ли совпадает
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	---

													радиальное уравнение с уравнением Шредингера для микрочастицы с одной степенью свободы? Записать выражение для эффективной потенциальной энергии микрочастицы, фигурирующей в радиальном уравнении. Что является причиной вырождения энергетических уровней микрочастицы в поле центральной силы? Имеются ли среди них невырожденные энергетические уровни? <u>Изучение материалов литературных источников:</u> [1], 1-216 [2], 110-135 [4], 1-100
7	Стационарные состояния системы двух взаимодействующих микрочастиц	20	4	-	6	-	-	-	-	-	10	-	<u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u> Самостоятельное изучение теоретического материала [1], стр. 146–157, 346-364 Литература 1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: В 10 т. Т.3: Квантовая механика (нерелятивистская теория). – М.: Физматлит, 2001, 2002. – 808 с.
7.1	Две взаимодействующие микрочастицы в квантовой механике	20	4	-	6	-	-	-	-	-	10	-	<u>Подготовка к практическим занятиям:</u> Подготовка ответов на вопросы и к решению задач: - Записать стационарное уравнение Шредингера для замкнутой системы двух частиц, потенциал взаимодействия между которыми зависит от расстояния между частицами. Методом разделения переменных показать, что это уравнение можно свести к системе уравнений для центра масс и относительного расположения исходных частиц. - Какое состояние замкнутой системы описывает волновая функция подсистемы, зависящей от координат центра масс? Почему решение уравнения Шредингера для этой подсистемы имеет вид

																<p>волновой функции свободной частицы? Какова масса этой частицы? - Какие обобщенные переменные удобно использовать для описания относительного расположения частиц? Используя метод разделения переменных записать систему уравнений для определения волновой функции относительного расположения частиц, а также выражение для приведенной массы двух частиц. - Представить качественный график потенциальной энергии, описывающей химическую связь в двухатомной молекуле. Определить на этом графике области действия межатомного притяжения и отталкивания, равновесное расстояние между атомами и энергию диссоциации молекулы. Как изменяется вид эффективной потенциальной энергии взаимодействия атомов в молекуле при изменении вращательного (азимутального) квантового числа? Каков вид эффективной потенциальной энергии при достижении вращательным квантовым числом значений, соответствующих состояниям предельной устойчивости молекулы в классическом и квантовом случае? - Изобразите качественно относительное расположение колебательных уровней энергии при фиксированном вращательном состоянии и опишите характер колебательно-вращательного энергетического спектра двухатомной молекулы. При каком условии для описания колебательно-вращательного спектра молекулы можно использовать модель «гармонический осциллятор - жесткий ротатор»? Как по порядку величины отличаются кванты колебательной и вращательной энергии? - Записать выражения для потенциальной энергии и эффективной потенциальной взаимодействия</p>
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	---

												<p>электрона и ядра в атоме водорода и водородоподобном ионе. Как изменяется вид эффективной потенциальной энергии в атоме водорода и водородоподобном ионе при изменении вращательного (азимутального) квантового числа? Имеются ли предельные значения вращательного квантового числа как в двухатомной молекуле? - Записать радиальное уравнение для атома водорода в безразмерных переменных. Чему равны характерные значения расстояния и энергии, используемые при переходе к безразмерным переменным? - Найти асимптотики радиального уравнения для связанных состояний в атоме водорода в безразмерных переменных при малых и больших расстояниях. Пояснить ход решения радиального уравнения для атома водорода в безразмерных переменных при определении связанных состояний. Установить соотношение между коэффициентами разложения в ряд функции, определяющей вид радиальной волновой функции. Каково соотношение между главным, орбитальным (колебательным) и азимутальным квантовыми числами в атоме водорода? - Используя выражение для радиальной волновой функции основного состояния атома водорода, найти наиболее вероятное и среднее расстояние электрона от ядра в основном состоянии. - Руководствуясь формулой для подсчета энергетических уровней, изобразите качественно энергетический спектр атома водорода в виде зависимости от колебательного (орбитального) квантового числа при нескольких значениях азимутального квантового числа ($l=0; 1;2$). На основе полученного изображения объясните природу случайного вырождения</p>
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

													энергетических уровней в атоме водорода. - Какие экспериментальные данные (и с какой точностью) подтверждают результаты теоретического расчета энергетических уровней атома водорода и водородоподобных ионов? <u>Изучение материалов литературных источников:</u> [4], 1-100
	Экзамен	36.0	-	-	-	-	2	-	-	0.5	-	33.5	
	Всего за семестр	180.0	32	-	48	-	2	-	-	0.5	64	33.5	
	Итого за семестр	180.0	32	-	48		2		-	0.5		97.5	

Примечание: Лек – лекции; Лаб – лабораторные работы; Пр – практические занятия; КПП – аудиторные консультации по курсовым проектам/работам; ИККП – индивидуальные консультации по курсовым проектам/работам; ГК- групповые консультации по разделам дисциплины; СР – самостоятельная работа студента; ИКР – иная контактная работа; ТК – текущий контроль; ПА – промежуточная аттестация

3.2 Краткое содержание разделов

1. Квантовая физика — революция в естествознании

1.1. Основы классической физики

Основы классической механики для систем многих частиц. Основные положения специальной теории относительности. Основы классической теории электромагнитного поля.

1.2. Физические основания квантовой механики

Истоки квантовой теории. Корпускулярно-волновой дуализм. Волновая функция и ее интерпретация.

2. Уравнение Шрёдингера

2.1. Уравнение Шрёдингера для микрочастиц

Волновая функция. Вычисление волновой функции. Замкнутая микросистема.

3. Операторы импульса, координаты и энергии микрочастицы

3.1. Операторы импульса, координаты и энергии в квантовой механике

Как построить оператор динамической переменной. Оператор импульса. Оператор координаты. Оператор Гамильтона.

4. Статистические характеристики динамических переменных

4.1. Динамические переменные в квантовой механике

Пространство волновых функций. Сопряжённые и самосопряжённые операторы. Собственные функции и собственные значения самосопряжённых операторов. Распределение вероятностей динамической переменной. Теоремы Эрнфеста.

5. Соотношения неопределённостей

5.1. Соотношения неопределённостей в квантовой механике

Коммутация операторов. Свойства произведений операторов. Теорема Гейзенберга. Общие собственные функции коммутирующих самосопряжённых операторов. Когда динамические переменные могут, а когда не могут одновременно иметь определённые значения?. Динамическое уравнение Гейзенберга.

6. Микрочастица в поле центральной силы

6.1. Поведение микрочастицы в центральном поле

Момент импульса. Оператор момента импульса. Собственные функции и собственные значения оператора момента импульса. Стационарные состояния микрочастицы в поле центральной силы.

7. Стационарные состояния системы двух взаимодействующих микрочастиц

7.1. Две взаимодействующие микрочастицы в квантовой механике

Переносное и относительное движение двух частиц. Двухатомная молекула. Атом водорода и водородоподобные ионы.

3.3. Темы практических занятий

1. Атом водорода и водородоподобные ионы;
2. Основы классической механики для систем многих частиц;
3. Переносное и относительное движение двух частиц;
4. Момент импульса. Оператор момента импульса. Стационарные состояния микрочастицы в поле центральной силы;
5. Коммутация операторов. Неравенство Гейзенберга.;
6. Теоремы Эренфеста. Соотношение неопределенностей;
7. Сопряжённые и самосопряжённые операторы. Распределение вероятностей динамической переменной;
8. Функциональное пространство. Скалярное произведение функций. Амплитуда и вероятность перехода
.;
9. Оператор энергии (оператор Гамильтона).;
10. Оператор координаты;
11. Оператор импульса;
12. Двухатомная молекула;
13. Решение уравнения Шредингера методом разделения переменных. Стационарные состояния;
14. Волновой пакет. Волновая функция и ее интерпретация;
15. Корпускулярно-волновой дуализм. Дифракция электронов;
16. Фотоны. Эффект Комптона.;
17. Черное излучение. Фотоэффект..Теплоемкость твердых тел. Атом Бора;
18. Истоки квантовой теории;
19. Уравнения Максвелла. Электромагнитные волны;
20. Основы классической теории электромагнитного поля;
21. Преобразования Лоренца. Энергия релятивистской частицы;
22. Основные положения специальной теории относительности;
23. Уравнение Шредингера для одной и нескольких микрочастиц.;
24. Классическая картина мира.

3.4. Темы лабораторных работ не предусмотрено

3.5 Консультации

Текущий контроль (ТК)

1. Вне рамок контрольных мероприятий текущий контроль осуществляется посредством устного опроса студентов и обсуждения вопросов студентов на практических занятиях. В случае, если у студента появились дополнительные вопросы, он может задать их преподавателю в письменном виде посредством корпоративной электронной почты НИУ «МЭИ». При необходимости консультация может быть продолжена в формате видеосвязи с использованием одной из интернет-платформ. Непосредственно перед экзаменом проводится групповая консультация по всем разделам и темам курса "Квантовая механика", включая раздел "Квантовая физика - революция в естествознании".
2. Вне рамок контрольных мероприятий текущий контроль осуществляется посредством устного опроса студентов и обсуждения вопросов студентов на практических занятиях. В случае, если у студента появились дополнительные вопросы, он может задать их преподавателю в письменном виде посредством корпоративной электронной почты НИУ «МЭИ». При необходимости консультация

может быть продолжена в формате видеосвязи с использованием одной из интернет-платформ. Непосредственно перед экзаменом проводится групповая консультация по всем разделам и темам курса "Квантовая механика", включая раздел "Уравнение Шредингера".

3. Вне рамок контрольных мероприятий текущий контроль осуществляется посредством устного опроса студентов и обсуждения вопросов студентов на практических занятиях. В случае, если у студента появились дополнительные вопросы, он может задать их преподавателю в письменном виде посредством корпоративной электронной почты НИУ «МЭИ». При необходимости консультация может быть продолжена в формате видеосвязи с использованием одной из интернет-платформ. Непосредственно перед экзаменом проводится групповая консультация по всем разделам и темам курса "Квантовая механика", включая раздел "Операторы импульса, координаты и энергии микрочастицы".
4. Вне рамок контрольных мероприятий текущий контроль осуществляется посредством устного опроса студентов и обсуждения вопросов студентов на практических занятиях. В случае, если у студента появились дополнительные вопросы, он может задать их преподавателю в письменном виде посредством корпоративной электронной почты НИУ «МЭИ». При необходимости консультация может быть продолжена в формате видеосвязи с использованием одной из интернет-платформ. Непосредственно перед экзаменом проводится групповая консультация по всем разделам и темам курса "Квантовая механика", включая раздел "Статистические характеристики динамических переменных".
5. Вне рамок контрольных мероприятий текущий контроль осуществляется посредством устного опроса студентов и обсуждения вопросов студентов на практических занятиях. В случае, если у студента появились дополнительные вопросы, он может задать их преподавателю в письменном виде посредством корпоративной электронной почты НИУ «МЭИ». При необходимости консультация может быть продолжена в формате видеосвязи с использованием одной из интернет-платформ. Непосредственно перед экзаменом проводится групповая консультация по всем разделам и темам курса "Квантовая механика", включая раздел "Соотношение неопределенностей".
6. Вне рамок контрольных мероприятий текущий контроль осуществляется посредством устного опроса студентов и обсуждения вопросов студентов на практических занятиях. В случае, если у студента появились дополнительные вопросы, он может задать их преподавателю в письменном виде посредством корпоративной электронной почты НИУ «МЭИ». При необходимости консультация может быть продолжена в формате видеосвязи с использованием одной из интернет-платформ. Непосредственно перед экзаменом проводится групповая консультация по всем разделам и темам курса "Квантовая механика", включая раздел "Микрочастица в поле центральной силы".
7. Вне рамок контрольных мероприятий текущий контроль осуществляется посредством устного опроса студентов и обсуждения вопросов студентов на практических занятиях. В случае, если у студента появились дополнительные вопросы, он может задать их преподавателю в письменном виде посредством корпоративной электронной почты НИУ «МЭИ». При необходимости консультация может быть продолжена в формате видеосвязи с использованием одной из интернет-платформ. Непосредственно перед экзаменом проводится групповая консультация по всем разделам и темам курса "Квантовая механика", включая раздел "Стационарные состояния системы двух взаимодействующих микрочастиц".

3.6 Тематика курсовых проектов/курсовых работ

Курсовой проект/ работа не предусмотрены

3.7. Соответствие разделов дисциплины и формируемых в них компетенций

Запланированные результаты обучения по дисциплине (в соответствии с разделом 1)	Коды индикаторов	Номер раздела дисциплины (в соответствии с п.3.1)							Оценочное средство (тип и наименование)
		1	2	3	4	5	6	7	
Знать:									
Методы описания стационарных связанных состояний и состояний рассеяния одной микрочастицы во внешнем силовом поле, а также системы двух взаимодействующих микрочастиц	ИД-2ПК-3						+	+	Контрольная работа/Контрольное мероприятие – 4
Основные экспериментальные факты, необъяснимые с позиций классической физики и приведшие к созданию квантовой физики	ИД-2ПК-3	+					+	+	Контрольная работа/Контрольное мероприятие – 2
Основные принципы и теоретический аппарат классической и квантовой физики	ИД-2ПК-3	+	+	+	+	+			Контрольная работа/Контрольное мероприятие -1 Контрольная работа/Контрольное мероприятие – 3
Уметь:									
Вычислять энергетические и другие физические характеристики микрочастиц вещества, используя уравнение Шредингера.	ИД-2ПК-3		+		+		+	+	Контрольная работа/Контрольное мероприятие – 3 Контрольная работа/Контрольное мероприятие – 4
Оценивать степень влияния квантовых эффектов на теплофизические свойства веществ и протекание теплофизических процессов	ИД-2ПК-3	+					+	+	Контрольная работа/Контрольное мероприятие -1 Контрольная работа/Контрольное мероприятие – 2

4. КОМПЕТЕНТНОСТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ОСВОЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (ТЕКУЩИЙ КОНТРОЛЬ УСПЕВАЕМОСТИ, ПРОМЕЖУТОЧНАЯ АТТЕСТАЦИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ)

4.1. Текущий контроль успеваемости

5 семестр

Форма реализации: Письменная работа

1. Контрольное мероприятие -1 (Контрольная работа)
2. Контрольное мероприятие – 2 (Контрольная работа)
3. Контрольное мероприятие – 3 (Контрольная работа)
4. Контрольное мероприятие – 4 (Контрольная работа)

Балльно-рейтинговая структура дисциплины является приложением А.

4.2 Промежуточная аттестация по дисциплине

Экзамен (Семестр №5)

Итоговая оценка (ИО) по курсу "Квантовая механика" выставляется на основании семестровой и экзаменационной составляющей и определяется как средневзвешенное значение следующих величин — балла текущего контроля (БТК) и оценки на экзамене (ОЭ):
 $ИО = 0,4 * БТК + 0,6 * ОЭ$.

В диплом выставляется оценка за 5 семестр.

Примечание: Оценочные материалы по дисциплине приведены в фонде оценочных материалов ОПОП.

5. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

5.1 Печатные и электронные издания:

1. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика. В 10 т. Т.1. Механика : Учебное пособие для физических специальностей университетов / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц . – 4-е изд., испр . – М. : Наука, 1988 . – 216 с. - ISBN 5-02-013850-9 .;
2. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика: В 10 т. Т.2. Теория поля : Учебное пособие для физических специальностей университетов / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц . – 7-е изд., испр . – М. : Наука, 1988 . – 512 с. - ISBN 5-02-014420-7 .;
3. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика: В 10 т. Т.3 : Квантовая механика (нерелятивистская теория) : Учебное пособие для физических специальностей университетов / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц ; Ред. Л. П. Питаевский . – 5-е изд., стереотип . – М. : Физматлит, 2001 . – 808 с. - ISBN 5-922100-57-2 .;
4. Бобров, В. Б. Основные положения классической механики, специальной теории относительности и классической теории электромагнитного поля : учебное пособие по курсу "Квантовая механика" по направлению "Ядерная энергетика и теплофизика" / В. Б. Бобров, Нац. исслед. ун-т "МЭИ" (НИУ"МЭИ") . – Москва : Изд-во МЭИ, 2020 . – 100 с. - ISBN 978-5-7046-2355-7 .
http://elib.mpei.ru/action.php?kt_path_info=ktcore.SecViewPlugin.actions.document&fDocumentId=11327;
5. Бобров, В. Б. Основные положения нерелятивистской квантовой механики : учебное пособие по курсу "Квантовая механика" по направлению "Ядерная энергетика и теплофизика" / В. Б. Бобров, Нац. исслед. ун-т "МЭИ" (НИУ"МЭИ") . – Москва : Изд-во МЭИ, 2019 . – 108 с. - ISBN 978-5-7046-2236-9 .

http://elib.mpei.ru/action.php?kt_path_info=ktcore.SecViewPlugin.actions.document&fDocumentId=11048;

6. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.- "Квантовая механика (нерелятивистская теория)" Т. 3, (5-е изд., стер.), Издательство: "ФИЗМАТЛИТ", Москва, 2001 - (808 с.)

http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=2380.

5.2 Лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение:

1. Office / Российский пакет офисных программ;
2. Windows / Операционная система семейства Linux;
3. Acrobat Reader.

5.3 Интернет-ресурсы, включая профессиональные базы данных и информационно-справочные системы:

1. База данных журналов издательства Elsevier - <https://www.sciencedirect.com/>
2. Электронные ресурсы издательства Springer - <https://link.springer.com/>
3. Журналы Institute of Physics (IOP), Великобритания - <https://iopscience.iop.org/>

6. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Тип помещения	Номер аудитории, наименование	Оснащение
Учебные аудитории для проведения лекционных занятий и текущего контроля	Ж-120, Машинный зал ИВЦ	сервер, кондиционер
	Т-209, Учебная аудитория	стол преподавателя, стол учебный, стул, шкаф, вешалка для одежды, компьютерная сеть с выходом в Интернет, экран интерактивный, мультимедийный проектор, доска маркерная, компьютер персональный
Учебные аудитории для проведения практических занятий, КР и КП	Т-209, Учебная аудитория	стол преподавателя, стол учебный, стул, шкаф, вешалка для одежды, компьютерная сеть с выходом в Интернет, экран интерактивный, мультимедийный проектор, доска маркерная, компьютер персональный
Учебные аудитории для проведения промежуточной аттестации	Т-209, Учебная аудитория	стол преподавателя, стол учебный, стул, шкаф, вешалка для одежды, компьютерная сеть с выходом в Интернет, экран интерактивный, мультимедийный проектор, доска маркерная, компьютер персональный
Помещения для самостоятельной работы	Т-412, Учебная лаборатория вычислительной техники	стол преподавателя, стол учебный, стул, компьютерная сеть с выходом в Интернет, доска маркерная, компьютер персональный
Помещения для консультирования	Т-205, Учебная аудитория	стол преподавателя, стол учебный, стул, шкаф, доска маркерная
Помещения для хранения оборудования и учебного инвентаря	Т-213, Подсобное помещение	

БАЛЛЬНО-РЕЙТИНГОВАЯ СТРУКТУРА ДИСЦИПЛИНЫ

Квантовая механика

(название дисциплины)

5 семестр

Перечень контрольных мероприятий текущего контроля успеваемости по дисциплине:

КМ-1 Контрольное мероприятие -1 (Контрольная работа)

КМ-2 Контрольное мероприятие – 2 (Контрольная работа)

КМ-3 Контрольное мероприятие – 3 (Контрольная работа)

КМ-4 Контрольное мероприятие – 4 (Контрольная работа)

Вид промежуточной аттестации – Экзамен.

Номер раздела	Раздел дисциплины	Индекс КМ:	КМ-1	КМ-2	КМ-3	КМ-4
		Неделя КМ:	5	8	13	16
1	Квантовая физика — революция в естествознании					
1.1	Основы классической физики		+	+	+	
1.2	Физические основания квантовой механики		+	+		
2	Уравнение Шрёдингера					
2.1	Уравнение Шрёдингера для микрочастиц		+		+	+
3	Операторы импульса, координаты и энергии микрочастицы					
3.1	Операторы импульса, координаты и энергии в квантовой механике		+		+	
4	Статистические характеристики динамических переменных					
4.1	Динамические переменные в квантовой механике		+		+	+
5	Соотношения неопределённостей					
5.1	Соотношения неопределённостей в квантовой механике		+	+	+	
6	Микрочастица в поле центральной силы					
6.1	Поведение микрочастицы в центральном поле		+	+	+	+
7	Стационарные состояния системы двух взаимодействующих микрочастиц					
7.1	Две взаимодействующие микрочастицы в квантовой механике		+	+	+	+

	Bec KM, %:	15	30	30	25
--	------------	----	----	----	----