

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»

«Утверждаю»

Декан факультета ВМК МГУ  
имени М.В. Ломоносова

академик



Е.И. Моисеев

2016г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

Квантовая механика и квантовые вычисления

Уровень высшего образования – подготовка научно-педагогических кадров в аспирантуре

Направление подготовки – «Информатика и вычислительная техника» (09.06.01)

Направленность (профиль) – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» (05.13.18)

## **РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**

### **1. НАИМЕНОВАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

Квантовая механика и квантовые вычисления

### **2. УРОВЕНЬ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**

Подготовка научно-педагогических кадров в аспирантуре.

### **3. НАПРАВЛЕНИЕ ПОДГОТОВКИ, НАПРАВЛЕННОСТЬ (ПРОФИЛЬ) ПОДГОТОВКИ**

Направление подготовки – «Информатика и вычислительная техника» (09.06.01). Направленность (профиль) – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» (05.13.18)

### **4. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОСНОВНОЙ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ**

Дисциплина входит в вариативную часть образовательной программы.

### **5 АННОТАЦИЯ**

Дисциплина «Квантовая механика и квантовые вычисления» содержит базовые сведения по квантовой теории: пространство квантовых состояний, операторы физических величин, уравнение Шредингера, унитарные эволюции и измерения, матрица плотности, запутанность, формализм Дирака. Даются начальные сведения из теории квантовых компьютеров: методы реализации квантовых гейтов, и квантовых вычислений: алгоритм Гровера, а также методы численного моделирования многочастичных квантовых систем.

The discipline "Quantum mechanics and quantum computations" will provide some basic information on quantum theory: the space of quantum states, operators of physical quantities, Schrödinger equation, unitary evolution and measurement, density matrix, entanglement, the formalism of Dirac. The basic data is given on the theory of quantum computers: methods of implementing quantum gates, and quantum computations: Grover's algorithm, as well as methods for the numerical simulation of many-particle quantum systems.

## 6. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ

Дисциплина участвует в формировании следующих компетенций образовательной программы:

Формируемые компетенции	Планируемые результаты обучения
<p>Владением методологией теоретических и экспериментальных исследований в области профессиональной деятельности</p> <p>(ОПК-1)</p>	<p>31 (ОПК-1) ЗНАТЬ: современные математические методы, применяющиеся для решения задач в области естественных наук, экономики, социологии и информационно-коммуникационных технологий</p> <p>У1 (ОПК-1) УМЕТЬ: применять современные методы постановки и анализа задач в области математики и информатики</p> <p>В1 (ОПК-1) ВЛАДЕТЬ: навыками оптимального выбора современных методов и средств постановки и анализа задач в области математики и информатики</p>
<p>Способность к реализации различных математических алгоритмов в виде программных комплексов, ориентированных на современную вычислительную технику</p> <p>(ПК-4)</p>	<p>ЗНАТЬ: современные методы реализации различных математических алгоритмов в виде программных комплексов, особенности современных вычислительных комплексов</p> <p><b>Код 31 (ПК-4)</b></p> <p>УМЕТЬ: применять современные методы реализации различных математических алгоритмов в виде программных комплексов с учетом особенностей современных вычислительных комплексов</p> <p><b>Код У1 (ПК-4)</b></p> <p>ВЛАДЕТЬ: навыками оптимального выбора и создания новых современных методов реализации математических алгоритмов в виде программных комплексов, учитывающих особенности современных вычислительных комплексов</p> <p><b>Код В1 (ПК-4)</b></p>
<p>Владение современными методами построения и анализа математических моделей, возникающих при решении естественнонаучных задач, а также методами разработки и реализации алгоритмов их решения на основе фундаментальных знаний в области математики и информатики</p>	<p>ЗНАТЬ: современные методы построения и анализа математических моделей, возникающих при решении естественнонаучных задач, а также современные методы разработки и реализации алгоритмов их решения</p> <p><b>Код 31 (ПК-1)</b></p>

(ПК-1)	<p><b>УМЕТЬ:</b> применять современные методы построения и анализа математических моделей, возникающих при решении естественнонаучных задач, а также современные методы разработки и реализации алгоритмов их решения <b>Код У1 (ПК-1)</b></p> <p><b>ВЛАДЕТЬ:</b> навыками оптимального выбора современных методов построения и анализа математических моделей, возникающих при решении естественнонаучных задач, а также современных методов разработки и реализации алгоритмов их решения <b>Код В1 (ПК-1)</b></p>
<p>Способность составлять и отлаживать программы расчета основных характеристик квантовых систем (спектр, собственные состояния, степень запутанности, время релаксации); с применением суперкомпьютера (СПК-69);</p>	<p>31 (СПК-69) Знать: основные понятия квантовой теории и сферу их применимости к практическим задачам квантовой информатики и квантовых вычислений</p> <p>31 (СПК-69) Уметь решать базовые задачи квантовой теории нескольких кубитов, в том числе с применением символьных и численных методов, применения пакетов прикладных программ.</p> <p>В1 (СПК-69) Владеть навыками оптимального выбора пакетов прикладных программ для квантовых расчетов и математических инструментов для моделирования квантовой динамики.</p>

Оценочные средства для промежуточной аттестации приведены в Приложении.

## 6. ОБЪЕМ ДИСЦИПЛИНЫ

Объем дисциплины составляет 3 зачетные единицы, всего 108 часа.

72 часа составляет контактная работа с преподавателем – 32 часов занятий лекционного типа, 26 часов занятий семинарского типа (семинары, научно-практические занятия, лабораторные работы и т.п.), 12 часов индивидуальных консультаций, 4 часа групповых консультаций, 8 часов мероприятий текущего контроля успеваемости, 4 часа промежуточной аттестации.

36 часа составляет самостоятельная работа учащегося.

## 7. ВХОДНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Учащиеся должны владеть знаниями по программированию, математическому анализу, линейной алгебре, дифференциальным уравнениям и краевым задачам, численным методам в объеме, соответствующем основным образовательным программам бакалавриата по укрупненным группам направлений и специальностей 01.00.00 «Математика и механика», 02.00.00 «Компьютерные и информационные науки».

## 8. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

В процессе обучения используются пакеты прикладных программ MATHEMATICA, язык программирования Python, пакет прикладных программ Lараск, методы распараллеливания OpenMP и MPI.

## 9. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины, форма промежуточной аттестации по дисциплине	Всего (часы)	В том числе								
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы					Самостоятельная работа учащегося, часы			
		из них					из них			
Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Групповые консультации	Индивидуальные консультации	Учебные занятия, направленные на проведение текущего контроля успеваемости: коллоквиумы, практические контрольные занятия и др.	Всего	Выполнение домашних заданий	Подготовка рефератов и т.п..	Всего		
<b>Тема 1. Основные понятия квантовой механики</b>	<b>36</b>	12	10	-	-	2	<b>24</b>	12	-	<b>12</b>

<p>Классическое и квантовое пространство состояний, эрмитовы и унитарные операторы, измерения и унитарная эволюция. Уравнение Шредингера и решение задачи Коши для него. Представление физических величин операторами. Операторы координаты, импульса, энергии, их собственные значения и собственные функции. Дельта-функции. Формализм Дирака. Понятие дискретизации, сопряженное пространство. Понятие измерения.</p> <p>Вычисление энергии основного состояния на компьютере. Диффузионный метод Монте-Карло.</p> <p>Тензорное произведение пространств, состояний и операторов. Запутанные состояния и запутывающие операторы. Частичные измерения и относительная матрица плотности.</p>										
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

<p>Чистые и смешанные состояния. Квантовая томография. Уравнение Шредингера для матрицы плотности. Разложение Шмидта и степень двухчастичной запутанности.</p> <p>Неравенство Белла. Квантовая нелокальность. Протокол телепортации.</p>										
<p><b>Тема 2. Принцип интерференции.</b></p> <p>Принцип интерференции как основа матричной механики. Понятие интеграла по путям Фейнмана. Эквивалентность интегрирования по путям и уравнения Шредингера. Случай свободной частицы и гармонического осциллятора.</p> <p>Соотношение неопределенности Бора-Гейзенберга для координаты и импульса. Анали-</p>	<b>16</b>	4	4	-	-	2	<b>10</b>	6	-	<b>6</b>

<p>тическая и алгебраическая формулировки принципа неопределенности.</p> <p>Оптическая иллюстрация принципа интерференции. Переход от классического описания системы к квантовому в терминах компьютерного моделирования квантовой динамики.</p>										
<p><b>Тема 3. Элементы теории момента количества движения.</b></p> <p>Момент импульса и его собственные значения и функции. Правила коммутации операторов. Коммутативные соотношения для компонентов момента.</p> <p>Обобщенный оператор момента и его отличие от момента импульса. Эксперимент Штерна-Герлаха и его интерпретация. Понятие спина электрона. Уравнение</p>	<b>16</b>	4	4	-	-	2	<b>10</b>	6	-	<b>6</b>

<p>Шредингера для электрона со спином. Матрицы Паули. Спинорные волновые функции.</p> <p>Бозоны и фермионы в терминах спина. Принцип запрета Паули.</p> <p>Спин композитной системы на примере 2 электронов. Различные базисы. Коэффициенты Клебша-Гордана.</p>										
<p><b>Тема 4. Элементы квантовых вычислений.</b></p> <p>Классические вычисления с оракулом и их сложность. Обратимый оракул. Понятие квантового алгоритма и квантового вычисления. Квантовый оракул. Квантовый параллелизм. Квантовое ускорение. Алгоритм Гровера для переборной задачи, его разновидности и оптимальность. Понятие нижних оценок квантовой сложности.</p>	34	10	10	-	-	2	22	12	-	12

<p>Квантовые гейты и их массивы. Квантовое преобразование Фурье и его сложность. Схема Абрамса-Ллойда и ее применение для факторизации целых чисел. Понятие алгоритма Шора (без подробного доказательства).</p> <p>Квантовое моделирование реальных микросистем. Алгоритм Залки-Визнера.</p> <p>Физическое конструирование квантовых гейтов на примере зарядовых кубитов. Гейт CNOT Валиева-Федичкина. Требования к качеству квантовых гейтов. Квантовая коррекция ошибок. Код Шора. Декогерентность и методы ее преодоления.</p>										
<p><b>Промежуточная аттестация – практическое контрольное задание + индивидуальное собеседование</b></p>	<p><b>6</b></p>	<p>-</p>	<p>-</p>	<p>2</p>	<p>-</p>	<p>4</p>	<p><b>6</b></p>	<p>0</p>	<p>-</p>	<p><b>0</b></p>

<b>Итого</b>	<b>108</b>	<b>72</b>	<b>36</b>
--------------	------------	-----------	-----------

## 10. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ УЧАЩИХСЯ

Самостоятельная работа учащихся состоит в изучении лекционного материала, учебно-методической литературы, подготовки к практическим заданиям текущего контроля и промежуточной аттестации.

## 11. РЕСУРСНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Основная учебно-методическая литература

- 1) Р.Фейнман, Д.Лейтон, П.Сэндз, «Квантовая механика», М.Наука, 2006.
- 2) Дж. Прескилл, «Квантовые вычисления и квантовые коммуникации» (1,2,3 тома), М.:Бином, 2009. Электронный вариант: Jh. Preskill, Quantum computations and communications, Lecture Notes in Computer Science, 2001.
- 3) Д.А.Кронберг, Ю.И.Ожигов, А.Ю.Чернявский, «Квантовая информатика и квантовый компьютер», изд.-во Макс-Пресс, МГУ, М. 2011.

Дополнительная учебно-методическая литература

- 1) Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц, «Квантовая механика. Нерелятивистская теория», М.Наука, Физ-мат. Лит. 1971.
- 2) Д.А.Кронберг, Ю.И.Ожигов, А.Ю.Чернявский, «Алгебраический аппарат квантовой информатики», изд.-во Макс-Пресс, МГУ, М. 2011.
- 3) Ю.И.Ожигов, «Квантовые вычисления», изд.-во Макс-Пресс, МГУ, 2003.
- 4) К.Коэн-Таннуджи, Б.Диу, Ф.Лалюэ, «Квантовая механика.» тома 1,3. М., URSS, 2016. - 412 стр.

Ресурсы информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»

- 1) <http://www.arxiv.org>, [quant-ph](http://quant-ph)
- 2) <http://sci.cs.msu.ru/>
- 3) <http://sqi.cs.msu.su/learning/materials>

Информационные технологии, используемые в процессе обучения

В процессе обучения используются пакеты прикладных программ МАТНЕМАТИСА, Lapack.

Материально-техническая база

Для преподавания дисциплины желательно иметь на ноутбуках слушателей установленный пакет МАТНЕМАТИСА, или интерпретатор Python, а также подключение к Интернет.

## **12. ЯЗЫК ПРЕПОДАВАНИЯ**

Русский

## **13. РАЗРАБОТЧИК ПРОГРАММЫ, ПРЕПОДАВАТЕЛИ**

д.ф.- м.н., профессор Ожигов Юрий Игоревич (ozhigov@cs.msu.su)

**Приложение**

**Оценочные средства для промежуточной аттестации по дисциплине «Квантовая механика и квантовые вычисления»**

Промежуточная аттестация состоит из двух этапов – выполнения практического контрольного задания, проверяющего приобретенные учащимся умения и навыки, и индивидуального собеседования, проверяющего приобретенные знания.

Средства для оценивания планируемых результатов обучения, критерии и показатели оценивания приведены ниже.

РЕЗУЛЬТАТ ОБУЧЕНИЯ	КРИТЕРИИ и ПОКАЗАТЕЛИ ОЦЕНИВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТА ОБУЧЕНИЯ из соответствующих карт компетенций					ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА
	1	2	3	4	5	
	<b>Неудовлетворительно</b>	<b>Неудовлетворительно</b>	<b>Удовлетворительно</b>	<b>Хорошо</b>	<b>Отлично</b>	
ЗНАТЬ: современные математические методы, применяющиеся для решения задач в области естественных наук, экономики, социологии и информационно-коммуникационных технологий Код 31 (ОПК-1)	Отсутствие знаний	Фрагментарные представления о современных математических методах, применяющихся для решения задач в области естественных наук, экономики, социологии и информационно-коммуникационных технологий	В целом сформированные, но неполные знания о современных математических методах, применяющихся для решения задач в области естественных наук, экономики, социологии и информационно-коммуникационных технологий	Сформированные, но содержащие отдельные пробелы знания о современных математических методах, применяющихся для решения задач в области естественных наук, экономики, социологии и информационно-коммуникационных технологий	Сформированные систематические знания о современных математических методах, применяющихся для решения задач в области естественных наук, экономики, социологии и информационно-коммуникационных технологий	Устный экзамен
УМЕТЬ: применять современные методы постановки и анализа задач в области	Отсутствие умений	Фрагментарные умения применять современные методы постановки и анализа задач в области математики и информатики	В целом успешное, но не систематическое умение применять современные методы постановки и анализа задач в области математики	Успешное, но содержащее отдельные пробелы умение применять современные методы постановки и анализа задач в области математики	Сформированное умение применять современные методы постановки и анализа задач в области математики и информатики	Устный экзамен

математики и информатики Код У1 (ОПК-1)			ки и информатики	ти математики и информатики	ки	
<b>ВЛАДЕТЬ:</b> навыками оптимального выбора современных методов и средств постановки и анализа задач в области математики и информатики Код В1 (ОПК-1)	Отсутствие навыков	Фрагментарное владение навыками оптимального выбора современных методов и средств постановки и анализа задач в области математики и информатики	В целом успешное, но не полное владение навыками оптимального выбора современных методов и средств постановки и анализа задач в области математики и информатики	Успешное, но содержащее отдельные пробелы владение навыками оптимального выбора современных методов и средств постановки и анализа задач в области математики и информатики	Сформированное владение навыками оптимального выбора современных методов и средств постановки и анализа задач в области математики и информатики	реферат
<b>ЗНАТЬ:</b> современные методы реализации различных математических алгоритмов в виде программных комплексов, особенности современных вычислительных комплексов Код З1 (ПК-4)	Отсутствие знаний	Фрагментарные представления о современных методах реализации различных математических алгоритмов в виде программных комплексов, особенностях современных вычислительных комплексов	В целом сформированные, но неполные знания о современных методах реализации различных математических алгоритмов в виде программных комплексов, особенностях современных вычислительных комплексов	Сформированные, но содержащие отдельные пробелы знания о современных методах реализации различных математических алгоритмов в виде программных комплексов, особенностях современных вычислительных комплексов	Сформированные систематические знания о современных методах реализации различных математических алгоритмов в виде программных комплексов, особенностях современных вычислительных комплексов	Устный экзамен
<b>УМЕТЬ:</b> применять современные методы реализации различных математических алгоритмов в виде программных комплексов	Отсутствие умений	Фрагментарные умения применять современные методы реализации различных математических алгоритмов в виде программных комплексов с учетом особенностей современных вычислительных комплексов	В целом успешное, но не систематическое умение применять современные методы реализации различных математических алгоритмов в виде программных комплексов с учетом особенностей со-	Успешное, но содержащее отдельные пробелы умение применять современные методы реализации различных математических алгоритмов в виде программных комплексов с учетом осо-	Сформированное умение применять современные методы реализации различных математических алгоритмов в виде программных комплексов с учетом особенностей современ-	отчет

с учетом особенностей современных вычислительных комплексов <b>Код У1 (ПК-4)</b>			временных вычислительных комплексов	бенностей современных вычислительных комплексов	ных вычислительных комплексов	
<b>ВЛАДЕТЬ:</b> навыками оптимального выбора и создания новых современных методов реализации математических алгоритмов в виде программных комплексов, учитывающих особенности современных вычислительных комплексов <b>Код В1 (ПК-4)</b>	Отсутствие навыков	Фрагментарное владение навыками оптимального выбора и создания новых современных методов реализации математических алгоритмов в виде программных комплексов, учитывающих особенности современных вычислительных комплексов	В целом успешное, но не полное владение навыками оптимального выбора и создания новых современных методов реализации математических алгоритмов в виде программных комплексов, учитывающих особенности современных вычислительных комплексов	Успешное, но содержащее отдельные пробелы владение навыками оптимального выбора и создания новых современных методов реализации математических алгоритмов в виде программных комплексов, учитывающих особенности современных вычислительных комплексов	Сформированное владение навыками оптимального выбора и создания новых современных методов реализации математических алгоритмов в виде программных комплексов, учитывающих особенности современных вычислительных комплексов	отчет
<b>ЗНАТЬ:</b> современные методы построения и анализа математических моделей, возникающих при решении естественнонаучных задач, а также современные	Отсутствие знаний	Фрагментарные представления о современных методах построения и анализа математических моделей, возникающих при решении естественнонаучных задач, а также современные методы разработки и реализации алгоритмов их решения	В целом сформированные, но неполные знания о современных методах построения и анализа математических моделей, возникающих при решении естественнонаучных задач, а также современные методы разработки и реализации алгоритмов их реше-	Сформированные, но содержащие отдельные пробелы знания о современных методах построения и анализа математических моделей, возникающих при решении естественнонаучных задач, а также современных методах разработки	Сформированные систематические знания о современных методах построения и анализа математических моделей, возникающих при решении естественнонаучных задач, а также современных методах разработки	Устный экзамен

<p>менные методы разработки и реализации алгоритмов их решения <b>Код 31 (ПК-1)</b></p>			<p>ния</p>	<p>и реализации алгоритмов их решения</p>	<p>и реализации алгоритмов их решения</p>	
<p><b>УМЕТЬ:</b> применять современные методы построения и анализа математических моделей, возникающих при решении естественнонаучных задач, а также современные методы разработки и реализации алгоритмов их решения <b>Код У1 (ПК-1)</b></p>	<p>Отсутствие умений</p>	<p>Фрагментарные умения применять современные методы построения и анализа математических моделей, возникающих при решении естественнонаучных задач, а также современные методы разработки и реализации алгоритмов их решения</p>	<p>В целом успешное, но не систематическое умение применять современные методы построения и анализа математических моделей, возникающих при решении естественнонаучных задач, а также современные методы разработки и реализации алгоритмов их решения</p>	<p>Успешное, но содержащее отдельные пробелы умение применять современные методы построения и анализа математических моделей, возникающих при решении естественнонаучных задач, а также современные методы разработки и реализации алгоритмов их решения</p>	<p>Сформированное умение применять современные методы построения и анализа математических моделей, возникающих при решении естественнонаучных задач, а также современные методы разработки и реализации алгоритмов их решения</p>	<p>Отчет</p>
<p><b>ВЛАДЕТЬ:</b> навыками оптимального выбора современных методов построения и анализа математических моделей, возникающих при решении есте-</p>	<p>Отсутствие навыков</p>	<p>Фрагментарное владение навыками оптимального выбора современных методов построения и анализа математических моделей, возникающих при решении естественнонаучных задач, а также современных</p>	<p>В целом успешное, но не полное владение навыками оптимального выбора современных методов построения и анализа математических моделей, возникающих при решении естественнонаучных задач, а также современ-</p>	<p>Успешное, но содержащее отдельные пробелы владение навыками оптимального выбора современных методов построения и анализа математических моделей, возникающих при решении естественнонаучных задач, а</p>	<p>Сформированное владение навыками оптимального выбора современных методов построения и анализа математических моделей, возникающих при решении естественнонаучных задач, а</p>	<p>отчет</p>

<p>ственнонаучных задач, а также современных методов разработки и реализации алгоритмов их решения</p> <p><b>Код В1 (ПК-1)</b></p>		<p>методов разработки и реализации алгоритмов их решения</p>	<p>менных методов разработки и реализации алгоритмов их решения</p>	<p>также современных методов разработки и реализации алгоритмов их решения</p>	<p>также современных методов разработки и реализации алгоритмов их решения</p>	
--	--	--	---	--	--	--

<p>31 (СПК-69)</p> <p>Знать:</p> <p>основные понятия квантовой теории и квантовых вычислений, вычислительные и программные инструменты для нахождения основных параметров квантовых систем, и сферу их применимости.</p>	<p>Отсутствие знаний</p>	<p>Фрагментарные представления об основных понятиях квантовой теории и квантовых вычислений, вычислительных и программных инструментах для нахождения основных параметров квантовых систем и сфере их применимости.</p>	<p>В целом сформированные, но неполные знания об основных понятиях квантовой теории и квантовых вычислений, вычислительных и программных инструментах для нахождения основных параметров квантовых систем и сфере их применимости.</p>	<p>Сформированные, но содержащие отдельные пробелы знания об основных понятиях квантовой теории и квантовых вычислений, вычислительных и программных инструментах для нахождения основных параметров квантовых систем и сфере их применимости.</p>	<p>Сформированные систематические знания об основных понятиях квантовой теории и квантовых вычислений, вычислительных и программных инструментах для нахождения основных параметров квантовых систем и сфере их применимости.</p>	<p>индивидуальное собеседование</p>
<p>У1 (СПК-69)</p> <p>Уметь</p> <p>решать базовые задачи квантовой ме-</p>	<p>Отсутствие умений</p>	<p>Фрагментарные умения в области решения базовых задач вычислительной математики и визуализации</p>	<p>В целом сформированное, но не систематическое умение решать базовые задачи вычислительной</p>	<p>Сформированное, но содержащее отдельные пробелы умение решать базовые задачи вычислитель-</p>	<p>Сформированное систематическое умение решать базовые задачи вычислительной ма-</p>	<p>практическое контрольное задание</p>

<p>ханики нескольких кубитов, в том числе с применением аналитических и численных методов; использовать для этого стандартные пакеты прикладных программ.</p>		<p>полученных результатов с помощью современных пакетов прикладных программ</p>	<p>математики, в том числе с применением символьных вычислений, и визуализировать полученные результаты с помощью современных пакетов прикладных программ</p>	<p>ной математики, в том числе с применением символьных вычислений, и визуализировать полученные результаты с помощью современных пакетов прикладных программ</p>	<p>тематики, в том числе с применением символьных вычислений, и визуализировать полученные результаты с помощью современных пакетов прикладных программ</p>	
<p>В1 (СПК-69) Владеть базовыми навыками решения задач квантовой механики нескольких кубитов, в том числе с применением аналитических и численных методов; с использованием для этого стандартных пакетов прикладных программ.</p>	<p>Отсутствие навыков</p>	<p>Фрагментарное владение базовыми навыками решения задач квантовой механики нескольких кубитов, в том числе с применением аналитических и численных методов; с использованием для этого стандартных пакетов прикладных программ</p>	<p>В целом сформированное, но не систематическое владение базовыми навыками решения задач квантовой механики нескольких кубитов, в том числе с применением аналитических и численных методов; с использованием для этого стандартных пакетов прикладных программ</p>	<p>Сформированное, но содержащее отдельные пробелы владение базовыми навыками решения задач квантовой механики нескольких кубитов, в том числе с применением аналитических и численных методов; с использованием для этого стандартных пакетов прикладных программ</p>	<p>Сформированное систематическое владение базовыми навыками решения задач квантовой механики нескольких кубитов, в том числе с применением аналитических и численных методов; с использованием для этого стандартных пакетов прикладных программ</p>	<p>практическое контрольное задание</p>

## Фонды оценочных средств

### Примерные практические контрольные задания для текущего контроля успеваемости.

ПКЗ ТК1. Численное решение краевой задачи Коши для уравнения Шредингера для одномерной частицы в бесконечно глубокой потенциальной яме ширины  $L$  при начальном распределении амплитуд  $f(0,x)$ , и найти константу нормировки  $c$ :

Примерные варианты заданий:

1.  $f(0,x) = -c \sin(2x)$
2.  $f(0,x) = c \sin(3x)$
3.  $f(0,x) = c \sin^2(x)$
4.  $f(0,x) = c \sin^2(4x)$

- 1.
- 2.
- 3.
- 4.

ПКЗ ТК2. Вычисление относительной матрицы плотности - для первого кубита, если задано двух-кубитное состояние вида

1.  $0.5 (|01\rangle - |00\rangle + |10\rangle - |11\rangle)$
2.  $0.5 (i |01\rangle + |00\rangle + |10\rangle + |11\rangle)$
3.  $0.5 (|00\rangle - i |01\rangle - |10\rangle - |11\rangle)$
4.  $0.5 (|00\rangle + i |01\rangle + i |10\rangle + |11\rangle)$ .

ПКЗ ТК3. Определение степени запутанности ненормированного состояния

- 1).  $|00\rangle - i |11\rangle$ , 2).  $|00\rangle - |01\rangle - |10\rangle + |11\rangle$ , 3).  $|00\rangle + |01\rangle + |10\rangle - |11\rangle$ .

### Список вопросов для индивидуального собеседования на промежуточной аттестации.

- 1) Общий вид однокубитового унитарного оператора.
- 2) Определение возможности одновременного измерения по двум наблюдаемым, заданным эрмитовыми матрицами.
- 3) Связь разложения Шмидта двух-кубитных состояний и SVD- разложения матрицы.
- 4) Свойства матрицы плотности.

- 5) Детальное описание протокола квантовой томографии для одного кубита. Проблема выбора базисов измерения для квантовой томографии  $n$  кубитов. Сложность томографического восстановления квантового состояния  $n$  кубитов (с обоснованием).
- 6) Чистые и смешанные состояния одного кубита в терминах сферы Блоха.
- 7) Распознавание запутывающих двух-кубитных унитарных операторов.
- 8) Вычисление тензорного произведения операторов.
- 9) Квантовое преобразование Фурье в случае одного и двух кубитов. Приближенное квантовое преобразование Фурье и его сложность. Связь дискретного и непрерывного преобразования Фурье с квантовой версией.
- 10) Переход от координатного базиса к импульсному в пространстве одной одномерной и одной двумерной частицы.
- 11) Алгоритм Гровера в случае известного числа решений. Сложность по сравнению с классическим перебором.
- 12) Алгоритм Гровера в случае неизвестного числа решений. Реализация алгоритма Гровера для двух кубитов.
- 13) Решение уравнения Шредингера на квантовом компьютере. Оценка числа требуемых кубитов.
- 14) Нахождение явного вида матрицы Уолша-Адамара.
- 15) Конструирование массива квантовых гейтов, реализующих алгоритм Гровера для 3 кубитов.
- 16) Численное решение задачи Коши уравнения Шредингера для системы 10 кубитов при заданном гамильтониане с использованием пакета MATHEMATICA, или Python со сторонними модулями.
- 17) Возможность применения программы численного нахождения основного состояния при заданном потенциале по диффузионному методу Монте-Карло для нахождения первого возбужденного состояния: развернутое объяснение.
- 18) Сравнение устойчивости запутанных состояний разных типов запутанных состояний 3 кубитов к ошибкам общего вида. Коррекция таких ошибок, возникающих для стационарного состояния. Метод коррекции ошибок, возникающих в ходе квантового вычисления.
- 19) Сложность схемы Залки-Визнера по памяти и времени. Распараллеливание при моделировании квантовых эволюций.
- 20) Границы возможностей для распараллеливания квантовых эволюций. Квантовый аналог GMSP – проблемы.
- 21) Связь унитарных квантовых ошибок со случайными измерениями. Метод коррекции в случае открытой квантовой системы.

### **Примерное практическое контрольное задание для промежуточной аттестации.**

ПКЗ ПА. Построение графика зависимости от времени степени запутанности трех-кубитной системы, эволюционирующей с заданным гамильтонианом, с использованием пакета MATHEMATICA или Python.

На каждом 10-шаге унитарной эволюции рассчитывается число Шмидта для заданного разбиения кубитов на 2 группы. Результат визуализируется стандартными средствами.

### **Методические материалы для проведения процедур оценивания результатов обучения**

Практическое контрольное задание для промежуточной аттестации является довольно объемным, поэтому частично выполняется в качестве четвертого задания для текущего контроля успеваемости. Выполнение каждого практического задания текущего контроля успеваемости может принести максимум 25 баллов, в итоге по результатам работы в семестре учащийся может набрать максимум 100 баллов. На

промежуточной аттестации можно также набрать 100 баллов – 60 баллов максимум по итогам индивидуального собеседования и 40 баллов максимум за выполнение практического контрольного задания. Итоговая сумма, не меньшая 170, соответствует оценке «отлично», от 135 до 169 – оценке «хорошо», от 90 до 134 – оценке «удовлетворительно», меньшая 90 – оценке «неудовлетворительно».