

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО «ВГУ»)

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
теории функций и геометрии



Семенов Е.М.

11.04.2022 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ
Б1.В.06 Квантовые компьютеры и квантовые вычисления

Код и наименование дисциплины в соответствии с учебным планом

1. Код и наименование направления подготовки/специальности:

01.05.01 Фундаментальная математика и механика

2. Профиль подготовки/специализация:

Современные методы теории функций в математике и механике

3. Квалификация выпускника: специалист

4. Форма обучения: очная

5. Кафедра, отвечающая за реализацию дисциплины:

Кафедра теории функций и геометрии

6. Составители программы: Мелешенко Петр Александрович, канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент кафедры теории функций и геометрии

7. Рекомендована: Научно-методическим Советом математического факультета, протокол № 0500-03 от 24.03.2022 г.

8. Учебный год: 2024/2025

Семестр(ы): 6

9. Цели и задачи учебной дисциплины

Цели изучения дисциплины:

- формирование у студентов комплекса знаний, умений и навыков в области квантовых компьютеров и квантовых вычислений.

Задачи дисциплины:

- изучить основные подходы к функционированию современных квантовых компьютеров, а также основных методов квантовых вычислений.

10. Место учебной дисциплины в структуре ООП:

Дисциплина «Квантовые компьютеры и квантовые вычисления» относится к дисциплинам блока Б1 основной профессиональной образовательной программы направления подготовки 01.05.01 – Фундаментальные математика и механика – Специалист.

Дисциплина «Нелинейная динамика и хаос» базируется на знаниях, полученных в рамках изучения дисциплин «Математический анализ», «Линейная алгебра», «Дифференциальные уравнения», и осуществляет разумный баланс между общеобразовательным содержанием выбранного профиля и его дальнейшей профессиональной направленностью, что, несомненно, повышает профессиональное самоопределение обучающихся и уровень их социальной адаптации.

11. Планируемые результаты обучения по дисциплине/модулю (знания, умения, навыки), соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями) и индикаторами их достижения:

Код	Название компетенции	Код(ы)	Индикатор(ы)	Планируемые результаты обучения
ПК-1	Способен проводить исследования по обработке и анализу научной информации и результатов исследований методами теории функций.	ПК-1.1	Обладает базовыми знаниями, полученными в области математических и (или) естественных наук, программирования и информационных технологий.	Знать: современные методы квантовой механики, а также подходы к анализу квантовых систем применительно к квантовым компьютерам.
ПК-2	Способен выявлять, применять, разрабатывать и целенаправленно использовать методы теории функций в задачах математики и механики.	ПК-2.1	Знает современные методы разработки и реализации моделей, используя теорию функций	Знать: методы исследования квантовых систем и свойства их гильбертова пространства.
		ПК-2.2	Умеет разрабатывать математические модели в области естествознания, экономики и управления, а также реализовывать алгоритмы математических моделей на базе пакетов прикладных программ моделирования.	Уметь: выбирать необходимый метод решения задачи квантовых вычислений.
		ПК-2.3	Имеет практический опыт научно-исследовательской деятельности в области решения задач аналитического характера	Владеть: методами построения квантовых алгоритмов на уровне аналитических выражений.
ПК-3	Способен к по-	ПК-3.1	Знает современные методы	Знать: методы реализации

строению моделей и оптимальному решению теоретических и прикладных задач математики и механики на основе методов теории функций и геометрии.		разработки и реализации математических моделей	алгоритмов квантовых вычислений на основе современных систем компьютерной математики.
--	--	--	---

12. Объем дисциплины в зачетных единицах/час. (в соответствии с учебным планом) — 3/108.

Форма промежуточной аттестации (зачет/экзамен) экзамен.

13. Трудоемкость по видам учебной работы

Вид учебной работы		Трудоемкость			
		Всего	По семестрам		
			6 семестр	№ семестра	...
Контактная работа		32	32		
в том числе:	лекции	16	16		
	практические	16	16		
	лабораторные				
Самостоятельная работа		40	40		
Контроль		36	36		
в том числе: курсовая работа (проект)					
Форма промежуточной аттестации экзамен					
Итого:		108	108		

13.1. Содержание дисциплины

п/п	Наименование раздела дисциплины	Содержание раздела дисциплины	Реализация раздела дисциплины с помощью онлайн-курса, ЭУМК *
1. Лекции			
1.1	История развития квантовой механики. Постулаты квантовой теории.	История развития квантовых представлений. Постулаты квантовой теории. Представление квантовых состояний и операторов. Понятие кубита. Трансформационные свойства квантовых состояний.	-----
1.2	Двухуровневые системы.	Спин $\frac{1}{2}$. Понятие о матрицах Паули. Спиновый резонанс для свободного электрона. Двухуровневая система. Поляризация	-----

		фотонов	
1.3	Понятие о матрице плотности.	Общие определения. Несепарабельность, чистые и запутанные состояния. Эволюция оператора плотности. Вектор поляризации. Спиновая матрица плотности. Разложение Шмидта.	
1.4	Общие принципы вычислений	Основные понятия алгебры логики. Вычислительные логические гейты. Обратимые логические гейты.	
1.5	Квантовые вычисления.	Основные преимущества квантовых вычислений. Логические однокубитовые гейты. Невозможность клонирования кубита. Состояния Белла.	
1.6	Квантовые алгоритмы	Алгоритма Дойча. Алгоритм Дойча-Джозса. Классы квантовых алгоритмов. Квантовое Фурье-преобразование.	
1.7	Оценка фазы и поиск в базе данных	Понятие об оценке фазы. Алгоритм Гровера поиска в базе данных.	
1.8	Квантовая телепортация	Понятие о квантовой телепортации и ее применениях.	
2. Практические занятия			
2.1	История развития квантовой механики. Постулаты квантовой теории.	История развития квантовых представлений. Постулаты квантовой теории. Представление квантовых состояний и операторов. Понятие кубита. Трансформационные свойства квантовых состояний.	-----
2.2	Двухуровневые системы.	Спин $\frac{1}{2}$. Понятие о матрицах Паули. Спиновый резонанс для свободного электрона. Двухуровневая система. Поляризация фотонов	-----
2.3	Понятие о матрице плотности.	Общие определения. Несепарабельность, чистые и запутанные состояния. Эволюция оператора плотности. Вектор поляризации. Спиновая матрица плотности. Разложение Шмидта.	-----
2.4	Общие принципы вычислений	Основные понятия алгебры логики. Вычислительные логические гейты. Обратимые логические гейты.	-----
2.5	Квантовые вычисления.	Основные преимущества квантовых вычислений. Логические однокубитовые гейты. Невозможность клонирования кубита. Состояния Белла.	
2.6	Квантовые алгоритмы	Алгоритма Дойча. Алгоритм Дойча-Джозса. Классы квантовых алгоритмов. Квантовое Фурье-преобразование.	
2.7	Оценка фазы и поиск в базе данных	Понятие об оценке фазы. Алгоритм Гровера поиска в базе данных.	
2.8	Квантовая телепортация	Понятие о квантовой телепортации и ее применениях.	

13.2. Темы (разделы) дисциплины и виды занятий

№ п/ п	Наименование темы (раздела) дисциплины	Виды занятий (количество часов)					
		Лекции	Практические	Лабораторные	Самостоятельная работа	Контроль	Всего
1	История развития квантовой механики. Постулаты квантовой теории.	2	2		4	4	12
2	Двухуровневые системы.	2	2		4	6	14
3	Понятие о матрице плотности.	2	2		8	6	18
4	Общие принципы вычислений	2	2		8	4	16
5	Квантовые вычисления.	2	2		8	4	16
6	Квантовые алгоритмы	2	2		8	4	16
7	Оценка фазы и поиск в базе данных	2	2		4	4	12
8	Квантовая телепортация	2	2		4	4	12
	Итого:	16	16		40	36	108

14. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины

В процессе освоения дисциплины студенты должны посетить лекционные и практические занятия и сдать экзамен.

Указания для освоения теоретического и практического материала и сдачи экзамена:

1. Обязательное посещение лабораторных занятий по дисциплине с конспектированием излагаемого преподавателем материала в соответствии с расписанием занятий.

2. Получение в библиотеке рекомендованной учебной литературы и электронное копирование рабочей программы с методическими рекомендациями, конспекта лекций.

3. Копирование (электронное) перечня вопросов к экзамену по дисциплине, а также списка рекомендованной литературы из рабочей программы дисциплины.

4. При подготовке к лабораторным занятиям по дисциплине необходимо изучить рекомендованный преподавателем материал, иметь при себе конспекты соответствующих тем и необходимый справочный материал.

5. Рекомендуется следовать советам преподавателя, связанным с освоением предлагаемого материала, провести самостоятельный Интернет - поиск информации (видеофайлов, файлов-презентаций, файлов с учебными пособиями) по ключевым словам курса и ознакомиться с найденной информацией при подготовке к зачёту по дисциплине.

15. Перечень основной и дополнительной литературы, ресурсов интернет, необходимых для освоения дисциплины

а) основная литература:

№ п/п	Источник
1	Нильсен, М. Квантовые вычисления и квантовая информация = Quantum

	Computation and Quantum Information / М. Нильсен, И. Чанг ; пер. с англ. под ред. М.Н. Вялого и П.М. Островского с предисловием К.А. Валиева .— М. : Мир, 2006 .— 822 с. : ил .— Библиогр.: с.785-809 .— Предм. указ.: с.810-815 .— ISBN 5-03-003524-9.
2	Валиев, Камиль Ахметович. Квантовые компьютеры: надежды и реальность / К. А. Валиев, А. А. Кокин .— 2-е изд., испр. — М.; Ижевск : Регулярная и хаотическая динамика, 2002 .— 320 с. : ил. — Библиогр. в конце глав. — Предм. указ.: с.314-319 .— ISBN 5-93972-024-2 (в пер.).

б) дополнительная литература:

№ п/п	Источник
3	Материалы семинаров научно-образовательного центра "Волновые процессы в неоднородных и нелинейных средах" / Воронеж. гос. ун-т; Под ред. А.С. Сидоркина .— Воронеж : Воронеж. гос. ун-т, 2003 .— 455 с. : ил .— Библиогр. в конце статей .— ISBN 5-9273-0448-6.
4	Кобаяси, Н. Введение в нанотехнологию / Н. Кобаяси ; пер. с яп. А.В. Хачояна под ред. Л.Н. Патрикеева .— М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005 .— 134 с. : ил.

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

№ п/п	Ресурс
5	https://habr.com/ru/post/480480/
6	https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwj2yrPh59T6AhWypYsKHxcSDicQFnoECBAQAQ&url=https%3A%2F%2Fmipt.ru%2Fupload%2Fmedialibrary%2Fd27%2Fprezentatsiya_kubity.pdf&u sg=AOvVaw3AGfls51oZETUUoh1INLwy

16. Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы

Данный курс направлен на формирование навыков в области квантовых компьютеров и квантовых вычислений на основе ключевых компетенций, способствующих овладению опытом в сфере математического моделирования. В течение всего курса студенты получают презентации и практические задания.

17. Информационные технологии, используемые для реализации учебной дисциплины, включая программное обеспечение и информационно-справочные системы (при необходимости)

Осуществляется интерактивная связь с преподавателем через сеть интернет, проводятся индивидуальные онлайн консультации.

18. Материально-техническое обеспечение дисциплины:

Для проведения практических занятий требуется аудитория на группу студентов, оборудованная маркерной, или меловой доской, компьютером преподавателя и персональные компьютеры слушателей с подключением к Internet.

19. Оценочные средства для проведения текущей и промежуточной аттестаций

Порядок оценки освоения обучающимися учебного материала определяется содержанием следующих разделов дисциплины:

№ п/п	Наименование раздела дисциплины (модуля)	Компетенция(и)	Индикатор(ы) достижения компетенции	Оценочные средства
1.	История развития квантовой механики. Постулаты квантовой теории.	ПК-1 ПК-2 ПК-3	ПК - 1.1 ПК - 2.1 ПК - 2.2 ПК - 2.3 ПК – 3.1	Промежуточная аттестация – экзамен, Практическое занятие 1
2.	Двухуровневые системы.	ПК-1 ПК-2	ПК - 1.1 ПК - 2.1 ПК - 2.2 ПК - 2.3	Промежуточная аттестация – экзамен, Практическое занятие 2
3.	Понятие о матрице плотности.	ПК-1 ПК-2 ПК-3	ПК - 1.1 ПК - 2.1 ПК - 2.2 ПК - 2.3 ПК – 3.1	Промежуточная аттестация – экзамен, Практическое занятие 3
4.	Общие принципы вычислений	ПК-1 ПК-2 ПК-3	ПК - 1.1 ПК - 2.1 ПК - 2.2 ПК - 2.3 ПК – 3.1	Промежуточная аттестация – экзамен, Практическое занятие 4
5	Квантовые вычисления.	ПК-1 ПК-2 ПК-3	ПК - 1.1 ПК - 2.1 ПК - 2.2 ПК - 2.3 ПК – 3.1	Промежуточная аттестация – экзамен, Практическое занятие 5
	Квантовые алгоритмы	ПК-1 ПК-2 ПК-3	ПК - 1.1 ПК - 2.1 ПК - 2.2 ПК - 2.3 ПК – 3.1	Промежуточная аттестация – экзамен, Практическое занятие 6
	Оценка фазы и поиск в базе данных	ПК-1 ПК-2 ПК-3	ПК - 1.1 ПК - 2.1 ПК - 2.2 ПК - 2.3 ПК – 3.1	Промежуточная аттестация – экзамен, Практическое занятие 7
	Квантовая телепортация	ПК-1 ПК-2 ПК-3	ПК - 1.1 ПК - 2.1 ПК - 2.2 ПК - 2.3 ПК – 3.1	Промежуточная аттестация – экзамен, Практическое занятие 8
Промежуточная аттестация форма контроля - экзамен				Экзаменационные билет

Код и содержание компетенции (или ее части)	Планируемые результаты обучения (показатели достижения заданного уровня)	Этапы формирования компетенции (разделы (те-	ФОС* (средства оценивания)
---	--	--	----------------------------

	освоения компетенции посредством формирования знаний, умений, навыков)	мы) дисциплины или модуля и их наименование)	
<p>ПК-1. Способен проводить исследования по обработке и анализу научной информации и результатов исследований методами теории функций.</p> <p>ПК-1.1. Обладает базовыми знаниями, полученными в области математических и (или) естественных наук, программирования и информационных технологий.</p> <p>ПК-2. Способен выявлять, применять, разрабатывать и целенаправленно использовать методы теории функций в задачах математики и механики.</p> <p>ПК-2.1. Знает современные методы разработки и реализации моделей, используя теорию функций</p> <p>ПК-2.2. Умеет разрабатывать математические модели в области естествознания, экономики и управления, а также реализовывать алгоритмы математических моделей на базе пакетов прикладных программ моделирования.</p> <p>ПК-2.3. Имеет практический опыт научно-исследовательской деятельности в области решения задач аналитического ха-</p>	<p>Знать: современные методы квантовой механики, а также подходы к анализу квантовых систем применительно к квантовым компьютерам; методы исследования квантовых систем и свойства их гильбертова пространства; методы реализации алгоритмов квантовых вычислений на основе современных систем компьютерной математики</p> <p>Уметь: выбирать необходимый метод решения прикладной задачи и разработать соответствующую математическую модель</p> <p>Владеть: методами построения квантовых алгоритмов на уровне аналитических выражений.</p>	<p>1 – 8</p>	<p>Экзаменационные билеты, контроль практических занятий.</p>

<p>рактера ПК-3. Способен к построению моделей и оптимальному решению теоретических и прикладных задач математики и механики на основе методов теории функций и геометрии. ПК-3.1. Знает современные методы разработки и реализации математических моделей.</p>			
Промежуточная аттестация			Экзамен

20 Типовые оценочные средства и методические материалы, определяющие процедуры оценивания

20.1 Текущий контроль успеваемости

Контроль успеваемости по дисциплине осуществляется с помощью следующих оценочных средств:

Оценка знаний, умений и навыков, характеризующая этапы формирования компетенций в рамках изучения дисциплины осуществляется в ходе текущей (устный опрос и контрольная работа) и промежуточной аттестаций.

Текущая аттестация проводится в форме устного опроса и также выполнения практических заданий.

Примерные задания на практические занятия

1. Вычислить коммутатор матриц Паули.
2. Найти произведение трех матриц Паули
3. Найти вероятность переворота спина электрона в осциллирующем магнитном поле (spin flip)
4. Найти вероятность заполнения уровня двухуровневой системы.
5. Кубит (спин $1/2$) находится в неизвестном чистом состоянии $|\psi\rangle$, выбранном случайно из ансамбля состояний, однородно распределенных на сфере Блоха. Выбирая случайным образом, что заданное состояние есть $|\varphi\rangle$, чему равна в среднем точность воспроизведения случайного выбора F , определяемая соотношением $F \equiv |\langle \varphi | \psi \rangle|^2$?

20.2 Промежуточная аттестация

Промежуточная аттестация по дисциплине осуществляется с помощью следующих оценочных средств:

Промежуточная аттестация включает в себя теоретические вопросы, позволяющие оценить уровень полученных знаний.

История развития квантовых представлений. Постулаты квантовой теории. Представление квантовых состояний и операторов. Понятие кубита. Трансформационные свойства квантовых состояний.
Спин $\frac{1}{2}$. Понятие о матрицах Паули. Спиновый резонанс для свободного электрона. Двухуровневая система. Поляризация фотонов
Общие определения. Несепарабельность, чистые и запутанные состояния. Эволюция оператора плотности. Вектор поляризации. Спиновая матрица плотности. Разложение Шмидта.
Основные понятия алгебры логики. Вычислительные логические гейты. Обратимые логические гейты.
Основные преимущества квантовых вычислений. Логические однокубитовые гейты. Невозможность клонирования кубита. Состояния Белла.
Алгоритма Дойча. Алгоритм Дойча-Джозса. Классы квантовых алгоритмов. Квантовое Фурье-преобразование.
Понятие об оценке фазы. Алгоритм Гровера поиска в базе данных.
Понятие о квантовой телепортации и ее применениях.

1. Постулаты квантовой теории.
2. Представление квантовых состояний и операторов.
3. Понятие кубита.
4. Трансформационные свойства квантовых состояний.
5. Спин $\frac{1}{2}$. Понятие о матрицах Паули.
6. Спиновый резонанс для свободного электрона.
7. Двухуровневая система. Поляризация фотонов
8. Оператор плотности Общие определения.
9. Несепарабельность, чистые и запутанные состояния.
10. Эволюция оператора плотности.
11. Вектор поляризации. Спиновая матрица плотности.
12. Разложение Шмидта.
13. Вычислительные логические гейты. Обратимые логические гейты.
14. Логические однокубитовые гейты.
15. Невозможность клонирования кубита. Состояния Белла.
16. Алгоритма Дойча.
17. Алгоритм Дойча-Джозса
18. Квантовое Фурье-преобразование.
19. Алгоритм Гровера поиска в базе данных.
20. Квантовая телепортация.

Критерии оценивания компетенций	Уровень сформированности компетенций	Шкала оценок
<ul style="list-style-type: none"> - обучающийся полно усвоил учебный материал; - проявляет навыки анализа, обобщения, критического осмысления и восприятия информации; - материал изложен грамотно, в определенной логической последовательности, точно используется терминология; - показано умение иллюстрировать теоретические положения конкретными примерами, применять их в новой ситу- 	Пороговый уровень и выше порогового	отлично

<p>ации;</p> <ul style="list-style-type: none"> - обучающимся продемонстрирована сформированность и устойчивость компетенций, умений и навыков; - могут быть допущены одна–две неточности при освещении второстепенных вопросов. 		
<p>ответ удовлетворяет в основном требованиям на оценку «отлично», но при этом имеет место один из недостатков:</p> <ul style="list-style-type: none"> - в усвоении учебного материала допущены небольшие пробелы, не искажившие содержание ответа; 	Пороговый уровень	хорошо
<ul style="list-style-type: none"> - неполно или непоследовательно раскрыто содержание материала, но показано общее понимание вопроса и продемонстрированы умения, достаточные для дальнейшего усвоения материала; - имелись затруднения или допущены ошибки в определении понятий, использовании терминологии, описании математических законов, - при неполном знании теоретического материала выявлена недостаточная сформированность компетенций, умений и навыков, обучающийся не может применить теорию в новой ситуации. 	Ниже порогового и пороговый уровень	удовлетворительно
<ul style="list-style-type: none"> - не раскрыто основное содержание учебного материала; - обнаружено незнание или непонимание большей или наиболее важной части учебного материала; - допущены ошибки в определении понятий, при использовании терминологии, - не сформированы компетенции, отсутствуют соответствующие знания, умения и навыки. 	Ниже порогового уровня	неудовлетворительно