

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

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой
цифровых технологий

 / Кургалин С.Д.

22.04.2024 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Б1.В.15 КВАНТОВЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ

- 1. Код и наименование направления подготовки:**
02.03.01 Математика и компьютерные науки
- 2. Профиль подготовки:**
математическое и программное обеспечение информационных систем и технологий
- 3. Квалификация выпускника:**
бакалавр
- 4. Форма обучения:** очная
- 5. Кафедра, отвечающая за реализацию дисциплины:**
кафедра цифровых технологий
- 6. Составители программы:**
Клинских Александр Федотович, д.ф.-м.н., профессор
- 7. Рекомендована:**
НМС ФКН (протокол № 5 от 05.03.2024)
- 8. Учебный год:** 2026-2027, 2027-2028 **Семестр:** 6, 7

9. Цели и задачи учебной дисциплины

Целями освоения учебной дисциплины являются:

– представить решение актуальных задач по обработке информации в виде реальных физических задач, основанных на постулатах квантовой механики.

Задачи учебной дисциплины:

– анализ квантовых алгоритмов для решения задач классификации, поиска, оптимизации;

– изучение протоколов для передачи квантовой информации.

10. Место учебной дисциплины в структуре ООП:

Дисциплина относится к части блока Б1, формируемой участниками образовательных отношений. Для успешного освоения дисциплины необходимо предварительное изучение линейной алгебры, математического анализа, а также владение навыками программирования.

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 демонстрировать базовые знания математических и естественных наук, основ программирования и информационных технологий.	ПК-1.1	Обладает базовыми знаниями, полученными в области математических и (или) естественных наук, программирования и информационных технологий.	Знать: основные понятия квантовых вычислений.
		ПК-1.2	Умеет находить, формулировать и решать стандартные задачи в собственной научно-исследовательской деятельности в математике и информатике.	Уметь: анализировать постановку задачи, пути достижения цели работы.
		ПК-1.3	Имеет практический опыт научно-исследовательской деятельности в математике и информатике.	Владеть: навыками работы в различных средах программирования.
ПК-3	Способен создавать и исследовать новые математические модели в естественных науках, промышленности и бизнесе, с учетом возможностей современных информационных технологий и программирования и компьютерной техники.	ПК-3.1	Знает основные методы проектирования и производства программного продукта, принципы построения, структуры и приемы работы с инструментальными средствами, поддерживающими создание программных продуктов и программных комплексов, их сопровождения, администрирования и развития (эволюции).	Знать: модель кубита, модель квантовой схемы.
		ПК-3.2	Умеет использовать методы проектирования и производства программного продукта, принципы построения, структуры и приемы работы с	Уметь: формулировать прикладную задачу в формализме квантовых алгоритмов и квантовых схем.

			инструментальными средствами, поддерживающими создание программного продукта.	
		ПК-3.3	Имеет практический опыт применения указанных выше методов и технологий.	Владеть: навыками работы с языком программирования Python.
ПК-4	Способен использовать современные методы разработки и реализации конкретных алгоритмов математических моделей на базе языков программирования и пакетов прикладных программ моделирования.	ПК-4.1	Знает современные методы разработки и реализации алгоритмов математических моделей на базе языков и пакетов прикладных программ моделирования.	Знать: возможности использования модуля Qiskit для квантовых вычислений.
		ПК-4.2	Умеет разрабатывать и реализовывать алгоритмы математических моделей на базе языков и пакетов прикладных программ моделирования.	Уметь: реализовать квантовый алгоритм в форме квантовой схемы.
		ПК-4.3	Имеет практический опыт разработки и реализации алгоритмов на базе языков и пакетов прикладных программ моделирования.	Владеть: навыками работы с модулем Qiskit.

12. Объем дисциплины в зачетных единицах/час — 5/180.

Форма промежуточной аттестации: зачет, зачет с оценкой

13. Трудоемкость по видам учебной работы

Вид учебной работы		Трудоемкость		
		Всего	По семестрам	
			6 семестр	7 семестр
Аудиторные занятия		82	50	32
в том числе:	лекции	50	34	16
	практические			
	лабораторные	32	16	16
Самостоятельная работа		98	22	76
в том числе: курсовая работа (проект)				
Форма промежуточной аттестации (зачет, зачет с оценкой)				
Итого:		180	72	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	Постулаты квантовой механики.	Основные понятия, обозначения, постулаты, неравенства Белла, оператор плотности.	https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=16239
1.2	Модель квантовой схемы.	Логические элементы (гейты). Однокубитовые и двухкубитовые гейты. Примеры квантовых алгоритмов. Реализация квантовых схем с использованием модуля Qiskit.	https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=16239

1.3	Элементы квантовой криптографии.	Квантовое распределение ключей. Примеры квантовых протоколов.	https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=16239
1.4	Основы квантовой теории информации.	Энтропия и информация. Энтропия Шеннона и энтропия фон Неймана. Различение квантовых состояний.	https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=16239
2. Практические занятия			
2.1	Постулаты квантовой механики.	Основные понятия, обозначения, постулаты, неравенства Белла, оператор плотности.	https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=16239
2.2	Модель квантовой схемы.	Логические элементы (гейты). Однокубитовые и двухкубитовые гейты. Примеры квантовых алгоритмов. Реализация квантовых схем с использованием модуля Qiskit.	https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=16239
2.3	Элементы квантовой криптографии.	Квантовое распределение ключей. Примеры квантовых протоколов.	https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=16239
2.4	Основы квантовой теории информации.	Энтропия и информация. Энтропия Шеннона и энтропия фон Неймана. Различение квантовых состояний.	https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=16239

13.2. Темы (разделы) дисциплины и виды занятий

№ п/п	Наименование темы (раздела) дисциплины	Виды занятий (количество часов)			
		Лекции	Лабораторные	Самостоятельная работа	Всего
1	Постулаты квантовой механики.	6	4	4	14
2	Модель квантовой схемы.	26	12	20	58
3	Элементы квантовой криптографии.	10	8	48	66
4	Основы квантовой теории информации.	8	8	26	42
	Итого:	50	32	98	180

14. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины

Освоение дисциплины складывается из аудиторной работы (учебной деятельности, выполняемой под руководством преподавателя) и внеаудиторной работы (учебной деятельности, реализуемой обучающимся самостоятельно).

Аудиторная работа состоит из работы на лекциях и выполнения практических заданий в объёме, предусмотренном учебным планом. Лекция представляет собой последовательное и систематическое изложение учебного материала, направленное на знакомство обучающихся с основными понятиями и теоретическими положениями изучаемой дисциплины.

Лекционные занятия формируют базу для практических занятий, на которых полученные теоретические знания применяются для решения конкретных практических задач. Обучающимся для успешного освоения дисциплины рекомендуется вести конспект лекций и практических занятий.

Самостоятельная работа предполагает углублённое изучение отдельных разделов дисциплины с использованием литературы, рекомендованной преподавателем, а также конспектов лекций, конспектов практических занятий. В качестве плана для самостоятельной работы может быть использован раздел 13.1 настоящей рабочей

программы, в котором зафиксированы разделы дисциплины и их содержание. В разделе 13.2 рабочей программы определяется количество часов, отводимое на самостоятельную работу по каждому разделу дисциплины. Больше количество часов на самостоятельную работу отводится на наиболее трудные разделы дисциплины. Для самостоятельного изучения отдельных разделов дисциплины используется перечень литературы и других ресурсов, перечисленных в пунктах 15 и 16 настоящей рабочей программы. Обязательным элементом самостоятельной работы является выполнение домашнего задания.

Успешность освоения дисциплины определяется систематичностью и глубиной аудиторной и внеаудиторной работы обучающегося.

При использовании дистанционных образовательных технологий и электронного обучения требуется выполнять все указания преподавателей, вовремя подключаться к онлайн-занятиям, ответственно подходить к заданиям для самостоятельной работы.

В рамках дисциплины предусмотрено проведение трёх текущих аттестаций за семестр. Результаты текущей успеваемости учитываются при выставлении оценки по промежуточной аттестации в соответствии с положением П ВГУ 2.1.04.16–2019 «Положение о текущей и промежуточной аттестации знаний, умений и навыков обучающихся на факультете компьютерных наук Воронежского государственного университета с использованием балльно-рейтинговой системы».

Обучение лиц с ограниченными возможностями здоровья осуществляется с учетом их индивидуальных психофизических особенностей и в соответствии с индивидуальной программой реабилитации. Для лиц с нарушением слуха при необходимости допускается присутствие на лекциях и практических занятиях ассистента, а также сурдопереводчиков и тифлосурдопереводчиков. Промежуточная аттестация для лиц с нарушениями слуха проводится в письменной форме, при этом используются общие критерии оценивания. При необходимости время подготовки на зачете может быть увеличено. Для лиц с нарушением зрения допускается аудиальное предоставление информации (например, с использованием программ-синтезаторов речи), а также использование на лекциях звукозаписывающих устройств (диктофонов и т.д.). На лекциях и практических занятиях при необходимости допускается присутствие ассистента. При проведении промежуточной аттестации для лиц с нарушением зрения тестирование может быть заменено на устное собеседование по вопросам. При необходимости время подготовки на экзамене может быть увеличено. Для лиц с нарушениями опорно-двигательного аппарата при необходимости допускается присутствие ассистента на лекциях и практических занятиях. Промежуточная аттестация для лиц с нарушениями опорно-двигательного аппарата проводится на общих основаниях, при необходимости процедура экзамена может быть реализована дистанционно.

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

а) основная литература:

№ п/п	Источник
1	Беззатеев, С. В. Основы квантовых вычислений : учебное пособие / С. В. Беззатеев, С. Г. Фомичева. — Санкт-Петербург : ГУАП, 2022. — 81 с. — ISBN 978-5-8088-1735-7. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/340919
2	Прилипко, В. К. Физические основы квантовых вычислений. Динамика кубита : монография / В. К. Прилипко, И. И. Коваленко. — Санкт-Петербург : Лань, 2022. — 216 с. — ISBN 978-5-8114-3383-4. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/205985

б) дополнительная литература:

№ п/п	Источник
1	Моргунов, Р. Б. Физические основы квантовых вычислений : учебное пособие / Р. Б. Моргунов, О. В. Коплак, О. С. Дмитриев ; Тамбовский государственный технический университет. – Тамбов : Тамбовский государственный технический университет (ТГТУ), 2017. – 98 с. : ил. – Режим доступа: по подписке. – URL: https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=498897
2	Холево, А. С. Квантовые системы, каналы, информация / А. С. Холево. – Москва : МЦНМО, 2010. – 327 с. – Режим доступа: по подписке. – URL: https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=63176
3	Борзунов, С. В. Языки программирования. Python: решение сложных задач / С. В. Борзунов, С. Д. Кургалин. — Санкт-Петербург : Лань, 2023. — 192 с. — ISBN 978-5-507-45923-0. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/319394

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

№ п/п	Ресурс
1	ЗНБ ВГУ: https://lib.vsu.ru/
2	Электронно-библиотечная система "Университетская библиотека online": http://biblioclub.ru/
3	Электронно-библиотечная система "Лань": https://e.lanbook.com/
4	Электронно-библиотечная система "Консультант студента": http://www.studmedlib.ru
5	Электронный университет ВГУ: https://edu.vsu.ru/

16. Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы

№ п/п	Источник
1	Борзунов, С. В. Языки программирования. Python: решение сложных задач / С. В. Борзунов, С. Д. Кургалин. — Санкт-Петербург : Лань, 2023. — 192 с. — ISBN 978-5-507-45923-0. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/319394
2	Прилипко, В. К. Физические основы квантовых вычислений. Динамика кубита : монография / В. К. Прилипко, И. И. Коваленко. — Санкт-Петербург : Лань, 2022. — 216 с. — ISBN 978-5-8114-3383-4. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/205985

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

При реализации дисциплины могут использоваться технологии электронного обучения и дистанционные образовательные технологии на базе портала edu.vsu.ru, а также другие доступные ресурсы сети Интернет.

18. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Аудитория для лекционных занятий: мультимедиа-проектор, экран для проектора, компьютер с выходом в сеть «Интернет». Специализированная мебель (столы ученические, стулья, доска). Программное обеспечение: LibreOffice v.5-7, программа для просмотра файлов формата pdf, браузер.

Аудитория для лабораторных занятий: компьютеры с выходом в сеть «Интернет» и доступом к электронным библиотечным системам, специализированная мебель (столы ученические, стулья, доска). Программное обеспечение: LibreOffice v.5-7, программа для просмотра файлов формата pdf, браузер.

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	Постулаты квантовой механики.	ПК-1 ПК-3 ПК-4	ПК-1.1, ПК-1.2, ПК-1.3 ПК-3.1, ПК-3.2, ПК-3.3 ПК-4.1, ПК-4.2, ПК-4.3	Лабораторные работы
2	Модель квантовой схемы.	ПК-1 ПК-3 ПК-4	ПК-1.1, ПК-1.2, ПК-1.3 ПК-3.1, ПК-3.2, ПК-3.3 ПК-4.1, ПК-4.2, ПК-4.3	Лабораторные работы
3	Элементы квантовой криптографии.	ПК-1 ПК-3 ПК-4	ПК-1.1, ПК-1.2, ПК-1.3 ПК-3.1, ПК-3.2, ПК-3.3 ПК-4.1, ПК-4.2, ПК-4.3	Лабораторные работы
4	Основы квантовой теории информации.	ПК-1 ПК-3 ПК-4	ПК-1.1, ПК-1.2, ПК-1.3 ПК-3.1, ПК-3.2, ПК-3.3 ПК-4.1, ПК-4.2, ПК-4.3	Лабораторные работы
Промежуточная аттестация форма контроля – зачёт, зачёт с оценкой				Перечень вопросов к зачёту

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: лабораторная работа.

Перечень лабораторных работ

1. Генерация случайных чисел
2. Генерация состояний базиса Белла
3. Схема измерений состояний Белла
4. Сравнение базисов: вычислительного, диагонального и кругового.

Типовое задание для лабораторной работы

Лабораторная работа № 2 «Генерация состояний базиса Белла»

Цель работы: ознакомиться с квантовой схемой генерации состояний Белла, разобрать работу схемы, проанализировать результаты работы схемы.

Требования к выполнению работы: выполнение лабораторной работы: написание программы, реализующей генерацию состояний базиса Белла.

Отчёт о работе проводится в виде собеседования и заключается в демонстрации работы программы, объяснении принципов работы алгоритма и ответов на дополнительные вопросы.

Критерии оценки: для получения оценки «зачтено» необходимо показать высокий уровень владения теоретическим материалом, уметь объяснить принцип работы написанной программы,

верно ответить на дополнительные вопросы.

Задание: написать программу, реализующую схему генерации состояний Белла. Проверить работу программы на контрольном примере.

20.2. Промежуточная аттестация

Промежуточная аттестация по дисциплине осуществляется с помощью следующих оценочных средств: перечень вопросов к зачету.

Перечень вопросов к зачёту

5 семестр

1. Постулаты квантовой механики
2. Оператор плотности
3. Неравенства Белла
4. Модель квантовой схемы
5. Двухкубитовые операции
6. Протоколы квантовой передачи информации
7. Задача Бернштейна-Вазирани
8. Задача Дойча. Алгоритм Дойча и Джозы
9. Алгоритм Саймона
10. Квантовое преобразование Фурье
11. Квантовое оценивание фазы
12. Задача нахождения порядка
13. Алгоритм Шора
- 14.. Алгоритм Гровера

Для оценивания результатов обучения на зачёте используются оценки: «зачтено» и «не зачтено».

Критерии оценивания компетенций	Уровень сформированности компетенций	Шкала оценок
Сформированные знания основных определений и понятий, рассмотренных в курсе. Изложение материала не содержит грубых ошибок. Сданы все задания, предусмотренные в текущей аттестации.	Пороговый уровень	Зачтено
Обучающийся демонстрирует отрывочные знания (либо их отсутствие) основных определений и понятий, рассмотренных в курсе. При изложении материала допускаются грубые ошибки. Задания, предусмотренные в текущей аттестации, выполнены не в полном объёме.	–	Не зачтено

6 семестр

1. Qiskit и квантовые вычисления
2. Квантовые схемы для генерации случайных чисел
3. Квантовые схемы генерации и измерений состояний Белла
4. Принципы квантовой криптографии
5. Квантовое распределение ключей

Для оценивания результатов обучения на зачёте с оценкой используется 4-балльная шкала: «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно».

Критерии оценивания компетенций	Уровень сформированности компетенций	Шкала оценок
<p>Дан полный, развёрнутый ответ на поставленный вопрос (вопросы), обучающийся свободно оперирует основными понятиями дисциплины, ориентируется в предметной области. Изложение материала не содержит ошибок, отличается последовательностью, грамотностью, логической стройностью.</p>	Повышенный уровень	Отлично
<p>Дан развёрнутый ответ на поставленный вопрос (вопросы), обучающийся свободно оперирует основными понятиями дисциплины, ориентируется в предметной области. Материал изложен в целом последовательно и грамотно, отсутствуют грубые ошибки, однако имеются отдельные неточности в определениях, вычислениях, доказательствах, изложениях положений теории.</p>	Базовый уровень	Хорошо
<p>Ответ на поставленный вопрос (вопросы) содержит изложение только базового теоретического материала, имеются ошибки в определениях, вычислениях, доказательствах, формулировках положений теории. Нарушена логическая последовательность в изложении материала.</p>	Пороговый уровень	Удовлетворительно
<p>Ответ на поставленный вопрос (вопросы) отсутствует, либо содержит грубые ошибки в определениях, вычислениях, доказательствах, формулировках положений теории. Обучающийся не владеет основными понятиями дисциплины. Отсутствует логическая последовательность в изложении материала.</p>	–	Неудовлетворительно