

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

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой
цифровых технологий

_____ / Кургалин С.Д.

03.05.2023 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Б1.В.ДВ.03.01 КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ ИНФОРМАЦИИ

- 1. Код и наименование направления подготовки/специальности:**
02.03.01 Математика и компьютерные науки
- 2. Профиль подготовки/специализация:**
квантовая теория информации
- 3. Квалификация выпускника:** бакалавр
- 4. Форма обучения:** очная
- 5. Кафедра, отвечающая за реализацию дисциплины:** цифровых технологий
- 6. Составители программы:**
Борзунов Сергей Викторович, к. ф.-м. н., доцент
- 7. Рекомендована:** НМС ФКН (протокол № 7 от 03.05.2023)
- 8. Учебный год:** 2026-2027 **Семестр:** 8

9. Цели и задачи учебной дисциплины

Цель: представить решение актуальных задач по обработке информации как реальные физические задачи, основанные на постулатах квантовой механики.

Задачи: анализ квантовых алгоритмов для решения задач классификации, поиска, оптимизации, а также 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 следующих разделов математики и физики: линейная алгебра; математический анализ.

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	Способен демонстрировать базовые знания математических и естественных наук, основ программирования и информационных технологий.	ПК-1.2	Умеет находить, формулировать и решать стандартные задачи в собственной научно-исследовательской деятельности в математике и информатике	Уметь: формулировать прикладную задачу в формализме квантовых алгоритмов и квантовых схем.
ПК-1	Способен демонстрировать базовые знания математических и естественных наук, основ программирования и информационных технологий.	ПК-1.3	Имеет практический опыт научно-исследовательской деятельности в математике и информатике	Владеть: навыками работы с библиотеками квантовых вычислений.
ПК-5	Способен участвовать в разработке технической документации программных продуктов и программных комплексов	ПК-5.1	Знает основные стандарты, нормы и правила разработки технической документации программных продуктов и программных комплексов	Знать: модель кубита, модель квантовой схемы.
ПК-5	Способен участвовать в разработке технической документации программных	ПК-5.2	Умеет использовать их при подготовке технической документации программных продуктов	Уметь: реализовать квантовый алгоритм в форме квантовой схемы.

	продуктов и программных комплексов			
ПК-5	Способен участвовать в разработке технической документации программных продуктов и программных комплексов	ПК-5.3	Имеет практический опыт подготовки технической документации	Владеть: навыками работы с библиотеками квантовых вычислений.

12. Объем дисциплины в зачетных единицах/час. — 2/72.

Форма промежуточной аттестации 8 семестр – зачёт.

13. Трудоемкость по видам учебной работы

Вид учебной работы	Трудоемкость	
	Всего	По семестрам
		8 сем.
Аудиторные занятия	24	24
в том числе:	лекции	12
	практические	
	лабораторные	12
Самостоятельная работа	48	48
Экзамен		
Итого:	72	72

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.	
1.2	Модель квантовой схемы	Логические элементы (гейты). Однокубитовые и двухкубитовые гейты. Примеры квантовых алгоритмов. Реализация квантовых схем с использованием модуля Qiskit.	
1.3	Элементы квантовой криптографии	Квантовое распределение ключей. Примеры квантовых протоколов.	
1.4	Основы квантовой теории информации	Энтропия и информация. Энтропия Шеннона и энтропия фон Неймана. Различение квантовых состояний.	
2. Практические занятия			
2.1	Модель квантовой схемы	Логические элементы (гейты). Однокубитовые и двухкубитовые гейты. Примеры квантовых алгоритмов. Реализация квантовых схем с использованием модуля Qiskit.	
2.2	Элементы квантовой криптографии	Квантовое распределение ключей. Примеры квантовых протоколов.	

2.3	Основы квантовой теории информации	Энтропия и информация. Энтропия Шеннона и энтропия фон Неймана. Различение квантовых состояний.	
-----	------------------------------------	---	--

13.2. Темы (разделы) дисциплины и виды занятий

№ п/п	Наименование темы (раздела) дисциплины	Виды занятий (количество часов)				Всего
		Лекции	Практические	Лабораторные	Самостоятельная работа	
1	Постулаты квантовой механики	2	-	0	10	12
2	Модель квантовой схемы	2	-	4	10	16
3	Элементы квантовой криптографии	4	-	4	12	20
4	Основы квантовой теории информации	4	-	4	16	24
	Итого:	12	0	12	48	72

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 (или лабораторных) 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 (или лабораторных) занятий, на которых полученные теоретические знания применяются для решения конкретных практических задач. Обучающимся для успешного освоения дисциплины рекомендуется вести конспект лекций и практических (лабораторных) занятий.

Самостоятельная работа предполагает углублённое изучение отдельных разделов дисциплины с использованием литературы, рекомендованной преподавателем, а также конспектов лекций, презентационным материалом (при наличии) и конспектов практических (лабораторных) 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.

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

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

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

а) основная литература:

№ п/п	Источник
1	Чуканов, С. Н. Квантовая теория информации : учебное пособие / С. Н. Чуканов, И. С. Чуканов, А. Г. Белик. — Омск : ОмГТУ, 2023. — 164 с. — ISBN 978-5-8149-3680-6. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/421505
2	Борзунов, С.В. Квантовые вычисления / С.В. Борзунов, С.Д. Кургалин. - Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2022. – (Серия: Учебная литература для вузов). – ISBN 978-5-9775-6853-1. – URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=48223083

б) дополнительная литература:

№ п/п	Источник
1	Квантовая теория : учебное пособие. — Воронеж : ВГУ, 2016 — Часть I — 2016. — 107 с. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/165306
2	Квантовая теория. Курс лекций : учебное пособие / И. В. Копытин, А. С. Корнев, Н. Л. Манаков, М. В. Фролов. — Воронеж : ВГУ, 2014 — Часть 2 — 2014. — 76 с. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/357362
3	Квантовая теория. Курс лекций : учебное пособие / И. В. Копытин, А. С. Корнев, Н. Л. Манаков, М. В. Фролов. — Воронеж : ВГУ, 2015 — Часть 3 — 2015. — 85 с. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/356462

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/

16. Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы

№ п/п	Источник
1	Чуканов, С. Н. Квантовая теория информации : учебное пособие / С. Н. Чуканов, И. С. Чуканов, А. Г. Белик. — Омск : ОмГТУ, 2023. — 164 с. — ISBN 978-5-8149-3680-6. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/421505

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.

Компьютерный класс: специализированная мебель, персональные компьютеры, мультимедийный проектор, экран.

ПО: ОС Windows v.7, 8, 10, Интерпретатор языка Python, дистрибутив Anaconda, IDE PyCharm, редактор Jupyter.

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)	Компетенции	Индикаторы достижения компетенции	Оценочные средства
1.	Разделы 1-4	ПК-1	ПК-1.1, ПК-1.2, ПК-1.3	Лабораторные работы
2.	Разделы 1-4	ПК-5	ПК-5.1, ПК-5.2, ПК-5.3	Лабораторные работы
Промежуточная аттестация форма контроля – зачёт				Письменный опрос

20. Типовые оценочные средства и методические материалы, определяющие процедуры оценивания

20.1. Текущий контроль успеваемости

Контроль успеваемости по дисциплине осуществляется с помощью лабораторных работ.

Типовые задания для лабораторных работ

Лабораторная работа № 1

«Состояния и измерения в квантовой теории информации»

Цель работы: изучить основные способы задания состояния квантовых систем и процедуру измерения в квантовой теории.

Требования к выполнению работы: обучающиеся должны составить программный код, визуализирующий сферу Блоха и базисных состояний $|0\rangle$, $|1\rangle$, $|+\rangle$, $|-\rangle$; выполнить моделирование процедуры измерения над указанными состояниями.

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: создать квантовый регистр с помощью одного кубита, визуализировать сферу Блоха для базисных состояний $|0\rangle$, $|1\rangle$, $|+\rangle$, $|-\rangle$; выполнить моделирование процедуры измерения над указанными состояниями.

Лабораторная работа № 2

«Операторы в квантовой теории информации»

Цель работы: изучить методы задания операторов в квантовой теории информации и их основные свойства.

Требования к выполнению работы: обучающиеся должны составить программный код для работы с матричным представлением эрмитовых и унитарных операторов.

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: Матрица H задается перечислением элементов $H = \text{np.array}(\text{[[0, -1j], [1j, 0]])}$. Вычислите e^{iH} двумя способами: согласно определению в виде суммы ряда и с помощью SciPy. Является ли H эрмитовой матрицей? Является ли iH эрмитовой матрицей? Вычислите собственные значения и собственные векторы оператора H .

Лабораторная работа № 3 «Энтропия квантовой системы»

Цель работы: изучить понятие энтропии квантовой системы, ее основные свойства и методы ее оценки.

Требования к выполнению работы: обучающиеся должны составить программный код для оценки меры неопределенности квантовой системы.

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: Если система задана матрицей плотности ρ , то энтропия фон Неймана вычисляется по формуле: $S = -\text{Tr}(\rho \log_2 \rho)$. Напишите функции, которые по заданной в файле input.txt матрице плотности вычисляют энтропию фон Неймана $S(\rho)$, линейную энтропию $S_L(\rho)$, энтропию Реньи $S_\alpha(\rho)$. Проверьте работу этих функций на численных примерах. Могут ли три перечисленных выше величины быть равными? Попарно равными? Если да, то выясните, при каких условиях это достигается, а если нет - объясните, почему.

20.2. Промежуточная аттестация

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

Перечень вопросов для письменного опроса

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
15. Qiskit и квантовые вычисления
16. Квантовые схемы исправления ошибок
17. Фазовые ошибки
18. Принципы квантовой криптографии
19. Квантовое распределение ключей
20. Энтропия и информация
21. Энтропия фон Неймана
22. Оптимальное различение квантовых состояний
23. Энтропия Реньи. Линейная энтропия.
24. Граница Холево.
25. Квантовые каналы связи.

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

Критерии оценивания компетенций	Уровень сформированности компетенций	Шкала оценок
Сформированные знания основных понятий, определений и теорем, изучаемых в курсе, возможно с затруднениями при воспроизведении.	Пороговый уровень	Зачтено
Обучающийся демонстрирует отрывочные знания (либо их отсутствие) основных понятий, определений и теорем, используемых в курсе.	–	Не зачтено