

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

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой
цифровых технологий



С.Д.Кургалин
30.06.2018 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Б1.В.17 КВАНТОВЫЕ КОМПЬЮТЕРЫ

1. Код и наименование направления подготовки/специальности:

02.03.01 Математика и компьютерные науки

2. Профиль подготовки/специализация: для всех профилей

3. Квалификация (степень) выпускника: бакалавр

4. Форма обучения: очная

5. Кафедра, отвечающая за реализацию дисциплины: цифровых технологий

6. Составители программы: Запрягаев Сергей Александрович, доктор физико-математических наук, профессор

7. Рекомендована: Научно-методическим советом факультета компьютерных наук (протокол № 6 от 25.06.2018)

8. Учебный год: 2020-2021

Семестр(ы): 5

9. Цели и задачи учебной дисциплины: изложение основных физических и математических понятий, принципов и методов, а также достигнутых к настоящему времени результатов, относящиеся к области квантовых вычислений и квантовой информации. Программа курса не предполагает, что слушатели знакомы с понятиями, принципами и законами нерелятивистской квантовой механики. Необходимые вопросы из разделов квантовой физики, теории операторов, теории унитарных преобразований включены в программу данного курса.

Курс ставит своей целью познакомить студентов с новейшим научным направлением, которое сформировалось на стыке квантовой механики и теории информации. Предметом изучения являются основные физические и математические понятия, принципы и методы, а также достигнутые к настоящему времени результаты. Идеи квантовой теории информации показали, что законы квантовой физики открывают совершенно новые возможности в целом ряде актуальных задач обработки информации и в квантовых вычислениях. Получение знаний о наиболее важных идеях и результатах в сфере квантовых вычислений и квантовой информации – компонент системы высшего ИТ образования, призванный привлечь внимание студентов к новой области ИТ науки.

В курсе приводятся необходимые сведения из классической теории информации, включая такие вопросы как энтропия, количество информации, обратимые логические операции, понятие вычислительной сложности. Обсуждаются физические принципы, лежащие в основе квантовой информатики. Вводится понятие кубита. Приводятся примеры физических систем, реализующих кубиты. Формулируются основные квантовые логические операции (гейты), необходимые для манипулирования квантовой информацией вообще и проведения квантовых вычислений, в частности. Подробно обсуждаются однокубитовые и двухкубитовые гейты. Дается представление о квантовых схемах, осуществляющих произвольные унитарные преобразования гильбертова пространства состояний n -кубитового регистра. Рассмотрены квантовые алгоритмы: задача Дойча, алгоритм Гровера, квантовое преобразование Фурье, алгоритм Шора, квантовая телепортация и элементы квантовой криптографии.

10. Место учебной дисциплины в структуре ООП: дисциплина относится к вариативной части блока Б1. Для успешного освоения дисциплины необходимо предварительное изучение курсов «Математический анализ», «Теория вероятностей».

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

Компетенция		Планируемые результаты обучения
Код	Название	
ПК-1	Способность к определению общих форм и закономерностей отдельной предметной области.	<p>знать: основные положения квантовой теории информации;</p> <p>уметь: описывать состояния кубита с помощью дираковского формализма, отображать состояния кубита на сфере Блоха;</p> <p>владеть: правилами составления квантовых логических цепей и навыками их изображения.</p>
ПК-5	Способность использовать методы математического и алгоритмического моделирования при решении теоретических и прикладных задач.	<p>знать: методы и протоколы квантовой криптографии, основные методы физической реализации элементной базы квантовых компьютеров;</p>

		<p>уметь: использовать понятия квантовых гейтов для проектирования квантовых информационных систем;</p> <p>владеть: навыками анализа основных квантовых алгоритмов.</p>
ПК-6	Способность передавать результат проведенных физико-математических и прикладных исследований в виде конкретных рекомендаций, выраженных в терминах предметной области изучавшегося явления.	<p>знать: различия между квантовыми и классическим вычислениями, понятия кубита, квантовой телепортации;</p> <p>уметь: ориентироваться в современных достижениях квантовой информатики;</p> <p>владеть: теорией и математическим аппаратом теории квантовых вычислений.</p>

12. Объем дисциплины в зачетных единицах/час — 4/144.

Форма промежуточной аттестации: 5 семестр – экзамен.

13. Виды учебной работы

Вид учебной работы	Трудоемкость (часы)	
	Всего	По семестрам
		5 сем.
Аудиторные занятия	68	68
в том числе: лекции	34	34
практические	34	34
лабораторные		
Самостоятельная работа	40	40
Экзамен	36	36
Итого:	144	144

13.1. Содержание дисциплины

п/п	Наименование раздела дисциплины	Содержание раздела дисциплины
1. Лекции		
1.1	Введение. Сложность алгоритма	Алгоритм. Классы сложности.
1.2	Теория чисел	Арифметика в классе вычетов. Теорема Ферма. Функции Эйлера. Китайская теорема об остатках. Дискретный логарифм.
1.3	Постулаты квантовой механики	Постулат состояния. Принцип суперпозиции. Постулат соответствия оператор – физическая величина. Постулат об изменении. Эволюция квантовых состояний. Представление квантовых состояний и операторов.
1.4	Кубит	Сфера Блоха. Трансформационные свойства.

1.5	Спин электрона	Матрицы Паули. Свойства матриц Паули. Спиновый резонанс для свободного электрона. Спин-флип.
1.6	Матрица плотности	Матрица плотности. Эволюция оператора плотности. Вектор поляризации. Спиновая матрица плотности. Разложение Шмидта.
1.7	Общие принципы вычислений	Основные понятия алгебры логики. Классические универсальные машины и логические гейты. Обратимые логические гейты.
1.8	Квантовые вычисления	Логические однокубитовые гейты. Контролируемые квантовые гейты. Невозможность клонирования кубита. Состояние Белла. Квантовый параллелизм.
1.9	Квантовые алгоритмы	Алгоритм Дойча. Алгоритм Дойча-Джосса. Квантовое Фурье-преобразование. Алгоритм оценки фазы. Алгоритм Шора. Алгоритм Гровера.
1.10	Квантовая криптография	Протоколы квантовой криптографии.
1.11	Квантовая телепортация	Спутанные состояния. Парадокс Эйнштейна-Подольского-Розена. Состояние Белла. Схема квантовой телепортации.
2. Практические занятия		
2.1	Введение. Сложность алгоритма	Алгоритм. Классы сложности.
2.2	Теория чисел	Арифметика в классе вычетов. Теорема Ферма. Функции Эйлера. Китайская теорема об остатках. Дискретный логарифм.
2.3	Постулаты квантовой механики	Постулат состояния. Принцип суперпозиции. Постулат соответствия оператор – физическая величина. Постулат об изменении. Эволюция квантовых состояний. Представление квантовых состояний и операторов.
2.4	Кубит	Сфера Блоха. Трансформационные свойства.
2.5	Спин электрона	Матрицы Паули. Свойства матриц Паули. Спиновый резонанс для свободного электрона. Спин-флип.
2.6	Матрица плотности	Матрица плотности. Эволюция оператора плотности. Вектор поляризации. Спиновая матрица плотности. Разложение Шмидта.
2.7	Общие принципы вычислений	Основные понятия алгебры логики. Классические универсальные машины и логические гейты. Обратимые логические гейты.
2.8	Квантовые вычисления	Логические однокубитовые гейты. Контролируемые квантовые гейты. Невозможность клонирования кубита. Состояние Белла. Квантовый параллелизм.
2.9	Квантовые алгоритмы	Алгоритм Дойча. Алгоритм Дойча-Джосса. Квантовое Фурье-преобразование. Алгоритм оценки фазы. Алгоритм Шора. Алгоритм Гровера.
2.10	Квантовая криптография	Протоколы квантовой криптографии.
2.11	Квантовая телепортация	Спутанные состояния. Парадокс Эйнштейна-Подольского-Розена. Состояние Белла. Схема квантовой телепортации.

13.2. Темы (разделы) дисциплины и виды занятий

№ п/п	Наименование темы (раздела) дисциплины	Виды занятий (часов)				
		Лекции	Практические	Лабораторные	Самостоятельная работа	Всего
1	Введение. Сложность алгоритма	2	2		2	6
2	Теория чисел	4	4		2	10

3	Постулаты квантовой механики	4	4		4	12
4	Кубит	4	4		4	12
5	Спин электрона	2	2		4	8
6	Матрица плотности	2	2		4	8
7	Общие принципы вычислений	2	2		4	8
8	Квантовые вычисления	4	4		4	12
9	Квантовые алгоритмы	4	4		4	12
10	Квантовая криптография	4	4		4	12
11	Квантовая телепортация	2	2		4	8
	Итого:	34	34		40	108

14. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины

При изучении дисциплины рекомендуется использовать следующие средства:

- рекомендуемую основную и дополнительную литературу;
- методические указания и пособия;
- контрольные задания для закрепления теоретического материала;
- электронные версии учебников и методических указаний для выполнения практических работ.

Форма организации самостоятельной работы: подготовка к аудиторным занятиям; выполнение домашних заданий; выполнение контрольных работ.

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

а) основная литература:

№ п/п	Источник
1	Холево, А.С. Квантовые системы, каналы, информация / А.С. Холево. — Москва : МЦНМО, 2010. — 327 с. — <URL: http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=63176 >.

б) дополнительная литература:

№ п/п	Источник
2	Запрягаев С.А. Квантовые компьютеры / С.А.Запрягаев // Волновые процессы в неоднородных и нелинейных средах : материалы семинаров науч.-образоват. центра. — Воронеж, 2003. — С. 96-194.
3	Кайе Ф. Введение в квантовые вычисления = An introduction to quantum computing / Ф. Кайе, Р. Лафлам, М. Моска ; пер. с англ. Т.С. Никитиной ; под науч. ред. А.В. Анохина. — М. ; Ижевск ; Институт компьютерных исследований : Регулярная и хаотическая динамика, 2009. — 346 с.
4	Валиев К. А. Квантовые компьютеры: надежды и реальность / К. А. Валиев, А. А. Кокин . — 2-е изд., испр. — М. : Ижевск : Регулярная и хаотическая динамика, 2002 . — 320 с.

в) информационные электронно-образовательные ресурсы:

№ п/п	Источник
5	www.lib.vsu.ru –ЗНБ ВГУ

16. Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы (учебно-методические рекомендации, пособия, задачки, методические указания по выполнению практических (контрольных) работ и др.)

№ п/п	Источник
1	Запрягаев С.А. Квантовые компьютеры / С.А.Запрягаев // Волновые процессы в неоднородных и нелинейных средах : материалы семинаров науч.-образоват. центра. — Воронеж, 2003. — С. 96-194.

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

18. Материально-техническое обеспечение дисциплины: лекционная аудитория, оборудованная мультимедийным проектором.

19. Фонд оценочных средств:

19.1 Перечень компетенций с указанием этапов формирования и планируемых результатов обучения

Код и содержание компетенции (или ее части)	Планируемые результаты обучения (показатели достижения заданного уровня освоения компетенции посредством формирования знаний, умений, навыков)	Этапы формирования компетенции (разделы (темы) дисциплины или модуля и их наименование)	ФОС (средства оценивания)
ПК-1	Знать: основные положения квантовой теории информации.	Разделы 1-11	Письменный опрос
	Уметь: описывать состояния кубита с помощью дираковского формализма, отображать состояния кубита на сфере Блоха.	Разделы 1-11	Письменный опрос

	Владеть: правилами составления квантовых логических цепей и навыками их изображения.	Разделы 1-11	Письменный опрос
ПК-5	Знать: методы и протоколы квантовой криптографии, основные методы физической реализации элементной базы квантовых компьютеров.	Разделы 1-11	Письменный опрос
	Уметь: использовать понятия квантовых гейтов для проектирования квантовых информационных систем.	Разделы 1-11	Письменный опрос
	Владеть: навыками анализа основных квантовых алгоритмов.	Разделы 1-11	Письменный опрос
ПК-6	Знать: различия между квантовыми и классическим вычислениями, понятия кубита, квантовой телепортации.	Разделы 1-11	Письменный опрос
	Уметь: ориентироваться в современных достижениях квантовой информатики.	Разделы 1-11	Письменный опрос
	Владеть: теорией и математическим аппаратом теории квантовых вычислений.	Разделы 1-11	Письменный опрос
Промежуточная аттестация			КИМ

19.2 Описание критериев и шкалы оценивания компетенций (результатов обучения) при промежуточной аттестации

Для оценивания результатов обучения на экзамене используются следующие показатели:

- 1) знание основных положений квантовой теории информации;
- 2) знание методов и протоколов квантовой криптографии, основных методов физической реализации элементной базы квантовых компьютеров;
- 3) знание различий между квантовыми и классическим вычислениями, понятия кубита, квантовой телепортации;
- 4) умение описывать состояния кубита с помощью дираковского формализма, отображать состояния кубита на сфере Блоха;
- 5) умение использовать понятия квантовых гейтов для проектирования квантовых информационных систем;
- 6) умение ориентироваться в современных достижениях квантовой информатики;
- 7) владение правилами составления квантовых логических цепей и навыками их изображения.
- 8) владение навыками анализа основных квантовых алгоритмов.
- 9) владение теорией и математическим аппаратом теории квантовых вычислений.

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

Критерии оценивания компетенций	Уровень сформированности компетенций	Шкала оценок
Полное соответствие ответа обучающегося всем перечисленным критериям. Обучающийся демонстрирует высокий уровень владения материалом, ориентируется в предметной области, верно отвечает на все дополнительные вопросы.	Повышенный уровень	Отлично
Ответ на контрольно-измерительный материал не соответствует одному или двум из перечисленных показателей, но обучающийся дает правильные ответы на дополнительные вопросы. Допускаются ошибки при воспроизведении части теоретических положений.	Базовый уровень	Хорошо
Ответ на контрольно-измерительный материал не соответствует	Пороговый	Удовлетвори-

любым трём из перечисленных показателей, обучающийся дает неполные ответы на дополнительные вопросы. Сформированные знания основных понятий, определений и теорем, изучаемых в курсе, не всегда полное их понимание с затруднениями при воспроизведении.	уровень	тельно
Ответ на контрольно-измерительный материал не соответствует любым четырём из перечисленных показателей. Обучающийся демонстрирует отрывочные знания (либо их отсутствие) основных понятий, определений и теорем, используемых в курсе.	–	Неудовлетворительно

19.3 Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, характеризующие этапы формирования компетенций в процессе освоения образовательной программы

19.3.1 Перечень вопросов к экзамену

1. Алгоритм.
2. Классы сложности.
3. Арифметика в классе вычетов.
4. Теорема Ферма. Функции Эйлера.
5. Китайская теорема об остатках.
6. Дискретный логарифм.
7. Постулат состояния.
8. Принцип суперпозиции.
9. Постулат соответствия оператор – физическая величина.
10. Постулат об изменении.
11. Эволюция квантовых состояний.
12. Представление квантовых состояний и операторов.
13. Сфера Блоха.
14. Трансформационные свойства.
15. Матрицы Паули.
16. Свойства матриц Паули.
17. Спиновый резонанс для свободного электрона.
18. Спин-флип.
19. Матрица плотности.
20. Эволюция оператора плотности.
21. Вектор поляризации.
22. Спиновая матрица плотности.
23. Разложение Шмидта.
24. Основные понятия алгебры логики.
25. Классические универсальные машины и логические гейты.
26. Обратимые логические гейты.
27. Логические однокубитовые гейты.
28. Контролируемые квантовые гейты.
29. Невозможность клонирования кубита.

30. Состояние Белла.
31. Квантовый параллелизм.
32. Алгоритм Дойча.
33. Алгоритм Дойча-Джосса.
34. Квантовое Фурье-преобразование.
35. Алгоритм оценки фазы.
36. Алгоритм Шора.
37. Алгоритм Гровера.
38. Протоколы квантовой криптографии
39. Спутанные состояния.
40. Парадокс Эйнштейна-Подольского-Розена.
41. Состояние Белла.
42. Схема квантовой телепортации.

19.3.2 Перечень вопросов для проведения письменного опроса

Раздел 1. Введение. Сложность алгоритма

1. Алгоритм.
2. Классы сложности.

Раздел 2. Теория чисел

1. Арифметика в классе вычетов.
2. Теорема Ферма. Функции Эйлера.
3. Китайская теорема об остатках.
4. Дискретный логарифм.

Раздел 3. Постулаты квантовой механики

1. Постулат состояния.
2. Принцип суперпозиции.
3. Постулат соответствия оператор – физическая величина.
4. Постулат об изменении.
5. Эволюция квантовых состояний.
6. Представление квантовых состояний и операторов.

Раздел 4. Кубит

1. Сфера Блоха.
2. Трансформационные свойства.

Раздел 5. Спин электрона

1. Матрицы Паули.

2. Свойства матриц Паули.
3. Спиновый резонанс для свободного электрона.
4. Спин-флип.

Раздел 6. Матрица плотности

1. Матрица плотности.
2. Эволюция оператора плотности.
3. Вектор поляризации.
4. Спиновая матрица плотности.
5. Разложение Шмидта.

Раздел 7. Общие принципы вычислений

1. Основные понятия алгебры логики.
2. Классические универсальные машины и логические гейты.
3. Обратимые логические гейты.

Раздел 8. Квантовые вычисления

1. Логические однокубитовые гейты.
2. Контролируемые квантовые гейты.
3. Невозможность клонирования кубита.
4. Состояние Белла.
5. Квантовый параллелизм.

Раздел 9. Квантовые алгоритмы

1. Алгоритм Дойча.
2. Алгоритм Дойча-Джосса.
3. Квантовое Фурье-преобразование.
4. Алгоритм оценки фазы.
5. Алгоритм Шора.
6. Алгоритм Гровера.

Раздел 10. Квантовая криптография

1. Протоколы квантовой криптографии

Раздел 11. Квантовая телепортация

1. Спутанные состояния.
2. Парадокс Эйнштейна-Подольского-Розена.
3. Состояние Белла.

4. Схема квантовой телепортации.

19.4. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, характеризующих этапы формирования компетенций

Оценка знаний, умений и навыков, характеризующая этапы формирования компетенций в рамках изучения дисциплины осуществляется в ходе текущей и промежуточной аттестаций.

Текущая аттестация проводится в соответствии с Положением о текущей аттестации обучающихся по программам высшего образования Воронежского государственного университета. Текущая аттестация проводится в формах: письменного опроса и контрольных работ. Критерии оценивания приведены выше.

Промежуточная аттестация проводится в соответствии с Положением о промежуточной аттестации обучающихся по программам высшего образования, а также в соответствии с Положением о балльно-рейтинговой системе контроля знаний на факультете компьютерных наук ВГУ.

Контрольно-измерительные материалы промежуточной аттестации включают в себя теоретические вопросы, позволяющие оценить уровень полученных знаний.

При оценивании используются качественные шкалы оценок. Критерии оценивания приведены выше.