

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»
Институт физики

УТВЕРЖДАЮ
Директор института физики
профессор, д.ф.-м.н. Вениг С.Б.

" 08 " 09 2022 г.

Рабочая программа дисциплины
Введение в теорию квантовых компьютеров




Направление подготовки бакалавриата
03.03.02 Физика

Профиль подготовки бакалавриата
Компьютерные технологии в медицинской физике

Квалификация (степень) выпускника
Бакалавр

Форма обучения
очная

Саратов,
2022

Статус	ФИО	Подпись	Дата
Преподаватели-разработчики	Чурочкин Дмитрий Викторович		23.05.2022
Председатель НМК	Скрипаль Анатолий Владимирович		05.09.2022
Заведующий кафедрой	Аникин Валерий Михайлович		23.05.2022
Специалист Учебного управления			

1. Цели освоения дисциплины

Целями освоения дисциплины являются углубление и расширение знаний в области новейших перспективных направлений в информационных технологиях, новых принципов кодирования, обработки, передачи информации и вычислений, основанных на квантовой физике.

Развитие информационных технологий привело в настоящее время к необходимости осмыслить возможности применения квантовой физики в информационной сфере и создания квантовых компьютеров. Увеличение мощности и производительности компьютеров достигается уменьшением физических размеров элементной базы. Однако, начиная с надмолекулярных масштабов, вступают в силу неклассические, квантовые законы взаимодействия. Поэтому производство, передача, прием, обработка, хранение и защита информации должны осуществляться совершенно по иным принципам, чем в классической информатике. Моделирование квантовых процессов, квантовые вычисления будут основаны на новых принципах, многие из которых уже успешно разрабатываются. Задача создания квантовых компьютеров требует нового развития основных принципов квантовой физики и квантовой оптики, притом ее решение имеет настолько масштабные перспективы, что введение этой дисциплины в подготовку по направлению 03.03.02 «Физика», представляется настоятельным.

В этой дисциплине рассмотрены основные принципы квантовой информации, включая квантовые вычислительные алгоритмы, квантовую телепортацию, квантовую криптографию, декогеренцию, квантовую коррекцию ошибок. Рассмотрены основные методы физической реализации элементной базы квантовых компьютеров. Реализация этих принципов и методов обещает новую революцию в области вычислений и коммуникаций.

Цели освоения дисциплины соотнесены с общими целями ООП ВО тем, что в число задач освоения дисциплины входит обеспечение студентов знаниями и навыками в области математических и естественнонаучных знаний, необходимых для понимания современных проблем квантовой физики, квантовой оптики, информационных технологий, для получения высшего профилированного образования, позволяющего выпускнику успешно работать в избранной сфере деятельности в РФ и за рубежом, обладать профессиональными компетенциями, способствующими его социальной мобильности, востребованности на рынке труда и успешной профессиональной карьере.

Цели и задачи дисциплины отвечают задачам подготовки бакалавров по направлению 03.03.02 «Физика» профиль «Компьютерные технологии в медицинской физике», в том числе задачам освоения методов научных исследований и их применения в инновационной деятельности, освоения теорий и моделей, используемых в информационных технологиях.

2. Место дисциплины в структуре ООП

Дисциплина «Введение в теорию квантовых компьютеров» относится к части, формируемой участниками образовательных отношений, Блока 1

Дисциплины (модули) учебного плана ООП, и является дисциплиной по выбору. Дисциплина адресована студентам, выбравшим направление 03.03.02 «Физика» профиль «Компьютерные технологии в медицинской физике», изучается в седьмом семестре (четвертый год обучения). Она включает в себя теоретическую и практическую части.

Для освоения дисциплины «Введение в теорию квантовых компьютеров» студенты используют знания, умения, навыки, сформированные в процессе изучения таких дисциплин, как «Оптика», «Атомная и ядерная физика», «Математический анализ и ТФКП», «Аналитическая геометрия и линейная алгебра», «Теория вероятностей и математическая статистика», «Дифференциальные уравнения», «Введение в информационные технологии», «Принципы построения и защиты информационных систем», «Основы физики твердого тела и полупроводниковая электроника», «Компьютерные технологии в микро- и нанoeлектронике», «Термодинамика», «Квантовая механика», «Компьютерная алгебра», и вычислительной практики.

Требования к «входным» знаниям, умениям и готовностям обучающегося, необходимым при освоении данной дисциплины и приобретенным в результате освоения предшествующих дисциплин:

- владеть основами линейной алгебры, а именно уметь решать системы линейных уравнений;
- знать теорию линейных операторов;
- готов применять полученные в области линейной алгебры знания к задачам квантового анализа данных;
- владеть операциями интегрирования и дифференцирования;
- владеть основами теории функций комплексного переменного;
- знать фурье-преобразование;
- уметь решать линейные дифференциальные уравнения в частных производных;
- готов применять аппарат теории дифференциальных уравнений в задачах квантовой механики;
- владеть основами программирования;
- знать основные принципы физической реализации компьютера;
- владеть основами квантовой теории, знать систему обозначений Дирака (бра и кет-вектора);
- знать основы электродинамики;
- готов применять знания, полученные в области атомной физики, фотоники и квантовой электродинамики, при расчете физических характеристик систем, на основе которых может быть осуществлена физическая реализация квантового компьютера;
- знать явления интерференции и дифракции;
- знать принципы работы лазера;
- знать основные принципы статистической физики и термодинамики;
- знать теорию строения атома, правила квантования, основное и возбужденное состояния атома;
- знать теорию двухуровневых систем во внешних полях;

– знать постулаты квантовой теории, сформулированные на основе представления о матрице плотности.

Знания, умения, навыки, полученные в ходе изучения этой дисциплины, позволяют успешно осваивать такие дисциплины, как «Современные компьютерные технологии в биомедицине», «Биомедицинские нанотехнологии», «Компьютерная томография», «Методы исследования нано-и биомедицинских систем», «Моделирование автоматизированных биомедицинских систем», и успешно пройти преддипломную практику.

Освоение дисциплины «Введение в теорию квантовых компьютеров» является необходимой основой для последующей подготовки выпускной квалификационной работы, продолжения образования в магистратуре и затем в аспирантуре.

3. Результаты обучения по дисциплине «Введение в теорию квантовых компьютеров»

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора (индикаторов) достижения компетенции	Результаты обучения
ПК-2.Способен проводить исследования на базе современных информационных и коммуникационных технологий и технических средств.	ПК-2.1. Владеет методологией математического моделирования физических процессов и объектов на базе как стандартных пакетов автоматизированного проектирования и исследований, так и самостоятельно создаваемых оригинальных программ.	Знать принципы математического моделирования физических процессов. Уметь пользоваться стандартными пакетами из комплекта разработки программного обеспечения QISKit для облачной среды IBM QuantumExperience. Владеть основами программирования в оболочке IBM QuantumExperience.

	<p>ПК-2.3. Применяет современные информационные средства при подготовке данных при составлении обзоров, отчетов и научных публикаций.</p>	<p>Знать основные современные методы расчета объекта научного исследования, использующие передовые информационные и коммуникационные технологии и технических средства.</p> <p>Уметь искать нужные источники информации и данные, анализировать информацию с использованием цифровых средств.</p> <p>Владеть методами поиска нужных источников информации и данных и анализа полученной информации.</p>
--	--	--

4. Структура и содержание дисциплины «Введение в теорию квантовых компьютеров»

Общая трудоемкость дисциплины составляет 5 зачетных единиц 180 часов.

№ п/п	Раздел дисциплины	Семестр	Неделя семестра	лекции	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)				Формы текущего контроля успеваемости (по неделям семестра) Формы промежуточной аттестации (по семестрам)
					Лабораторные занятия	ИКР	СР	Общая трудоемкость	
1.	Введение.	7	1-3	6	14	14	8	4	компьютерное моделирование задач
2.	Раздел 1. Общие принципы компьютерных вычислений.	7	4-6	6	0	0	8	4	дистанционный контроль в режиме «off-line»
3.	Раздел 2. Квантовые	7	7-8	4	7	7	8	4	компьютерное моделирование задач,

	схемы.								дистанционный контроль в режиме «off-line»
4.	Раздел 3. Квантовые алгоритмы.	7	9-12	8	35	35	8	4	компьютерное моделирование задач, дистанционный контроль в режиме «off-line»
5.	Раздел 4. Квантовая криптография.	7	13-14	4	0	0	8	4	дистанционный контроль в режиме «off-line»
	Промежуточная аттестация – 36 ч.	7							Экзамен Контрольная работа
	Итого за 7 семестр: 180 ч.			28	56	56	40	20	
	Общая трудоемкость дисциплины			180 часов					

Содержание разделов дисциплины «Введение в теорию квантовых компьютеров»

Введение. Математический аппарат линейной алгебры. Корпускулярно-волновой дуализм в физике. Принцип суперпозиции. Математический аппарат квантовой механики. Матрица плотности. Чистые и смешанные квантовые состояния. Парадокс Эйнштейна-Подольского-Розена (ЭПР). Запутанные состояния. Неравенства Белла. Теорема о запрете клонирования. Кубит. Сфера Блоха.

Раздел 1. Общие принципы компьютерных вычислений.

Тема 1.1. Связь между информацией и энергией. Принцип Ландауэра. Демон Максвелла.

Тема 1.2. Подходы к теории вычислений: машина Тьюринга и схемная модель вычислений. Основные логические операции булевой алгебры. Основные элементы логических схем компьютера – гейты *NOT*, *AND*, *OR*, *XOR*, *COPY*, *SWAP*, *ERASE*, *NAND*.

Тема 1.3. Логические цепи полусумматора и полного сумматора. Обратимые гейты – *CNOT*, *CCNOT* (универсальный гейт Тоффоли), *CSWAP* (универсальный гейт Фредкина). Информационный "мусор" и алгоритм Беннетта.

Тема 1.4. Анализ сложности вычислительных задач. Классы сложности **P** и **NP**. **NP**-полные задачи.

Раздел 2. Квантовые схемы.

Тема 2.1. Особенности квантовых вычислений. Однокубитовые гейты *X*, *Y*, *Z* и их представление матрицами Паули. Гейты Адамара и фазового вращения. Контролируемые квантовые гейты – *CNOT*, *CCNOT* и их матричная форма. Универсальный набор гейтов. Сложность квантовых вычислений.

Тема 2.2. Квантовая телепортация. Базисные двухчастичные состояния Белла.

Тема 2.3. Телепортация неизвестного квантового состояния с помощью базиса

Белла.

Тема 2.4. Сверхплотное кодирование.

Раздел 3. Квантовые алгоритмы.

Тема 3.1. Квантовый параллелизм, преобразование Уолша-Адамара.

Тема 3.2. Возврат фазы. Квантовые алгоритмы Дойча и Дойча-Йожа, Бернштейна-Вазирани и Саймона.

Тема 3.3. Квантовое преобразование Фурье. Алгоритм нахождения периода. Алгоритм Шора факторизации чисел. Алгоритм Гровера по поиску в неструктурированной базе данных.

Раздел 4. Квантовая криптография.

Тема 4.1. Криптография с открытым ключом. Система RSA.

Тема 4.2. Криптография с закрытым ключом. Одноразовый блокнот: шифр Вернама.

Тема 4.3. Квантовое распределение ключей. Криптография на основе кодирования поляризованных состояний фотонов (протокол BB84). Квантовая криптография, основанная на теореме Белла (ЭПР протокол).

Тема 4.4. Безопасность квантового распределения ключей. Возможные виды атак.

Темы лабораторных занятий по дисциплине «Введение в теорию квантовых компьютеров»

Лабораторная работа №1. Визуализация состояний кубита в Qiskit.

Лабораторная работа №2. Измерения в различных базисах.

Лабораторная работа №3. Двухкубитные операции с управлением.

Лабораторная работа №4. Изучение алгоритма Бернштейна-Вазирани.

Лабораторная работа №5. Изучение алгоритма Дойча-Йожа.

Лабораторная работа №6. Изучение алгоритма Саймона.

Лабораторная работа №7. Изучение алгоритма Шора по факторизации чисел.

Лабораторная работа №8. Изучение алгоритма Гровера по поиску в неструктурированной базе данных.

5. Образовательные технологии, применяемые при освоении дисциплины «Введение в теорию квантовых компьютеров»

При проведении занятий и организации самостоятельной работы студентов используются традиционные технологии сообщающего обучения, предполагающие передачу информации в готовом виде. К ним относятся: **аудиторные занятия в форме лекций** с использованием ПК для демонстрации материала; **лабораторные занятия**; **самостоятельная работа** в научной библиотеке университета, в компьютерном классе с использованием доступа к сети Internet.

Использование традиционных технологий обеспечивает необходимый уровень профессионального образования для студентов, регулярно посещающих аудиторные занятия. Они также формируют умения систематизировать, обобщать, извлекать из учебно-методической литературы

значимую информацию и т.п.

В процессе изучения теоретических разделов курса используются новые образовательные технологии обучения: демонстрационные программы; информационно-справочные системы; электронные учебники.

Данные технологии обеспечивают более наглядную подачу материала за счет мультимедиа. Использование электронных учебников и видеолекций позволяет разгрузить преподавателя и увеличить заинтересованность студентов в предмете. При работе с мультимедийными программами обеспечивается обратная связь, осуществляется быстрый поиск нужной информации, экономится время при многократных обращениях к гипертекстовым объяснениям; наряду с кратким текстом, объяснения сопровождаются демонстрацией анимационных эффектов и синхронным озвучиванием.

Помимо традиционных образовательных технологий также применяются дистанционные формы обучения в режимах off-line и on-line, которые позволяют получить полноценное образование студентам, которые по тем или иным причинам не могут регулярно посещать аудиторные занятия.

Профессиональные навыки у студентов формируются при моделировании на лабораторных занятиях единиц квантовой информации, т.е. кубитов, проблемы измерения, квантовых алгоритмов в программной среде Qiskit путем написания соответствующих программ и анализа полученных в результате исполнения этих программ данных.

Иная контактная работа (ИКР)

Групповая или индивидуальная работа обучающихся с педагогическими работниками кафедры включает в себя консультации в режиме «on-line» и/или «off-line» по разбору избранных разделов данной дисциплины и математического аппарата, используемого в ней.

Особенности образовательных технологий для инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья

Выбор методов обучения определяется содержанием дисциплины, уровнем профессиональной подготовки преподавателя, методического и материально-технического обеспечения, особенностями восприятия учебной информации студентами-инвалидами и студентами с ограниченными возможностями здоровья и т.д.

Для слабовидящих студентов в лекционных и учебных аудиториях должна быть предусмотрена возможность просмотра удаленных объектов (например, текста на доске или слайда на экране) при помощи видеоувеличителей для удаленного просмотра. Для чтения учебно-методической литературы необходимо предусмотреть наличие электронных луп. При необходимости должна быть предусмотрена возможность записи лекций на диктофон.

Слабослышащие студенты должны получать дополнительную информацию по дисциплине из видеоматериалов, подготовленных преподавателем (см. п.8 пп. б) *программное обеспечение и Интернет-ресурсы*).

При необходимости для лиц с ограниченными возможностями здоровья и

инвалидов учебные занятия могут быть организованы занятия с привлечением дистанционных образовательных технологий и средств удаленного доступа, проведением консультаций в интерактивном режиме on-line (Zoom, Skype) и (или) по электронной почте, через систему IpsilonUni, с обеспечением электронными образовательными ресурсами (электронными пособиями, презентациями).

Удельный вес занятий, проводимых в интерактивных формах, определяется главной целью (миссией) программы, особенностью контингента обучающихся и содержанием конкретных дисциплин, и в целом в учебном процессе они должны составлять не менее 30% аудиторных занятий. Занятия лекционного типа для соответствующих групп студентов не могут составлять более 50% аудиторных занятий в соответствии с федеральным государственным образовательным стандартом высшего образования по направлению 03.03.02 «Физика».

6. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины.

При изучении дисциплины «Введение в теорию квантовых компьютеров» предусмотрены следующие виды самостоятельной работы:

- разбор теоретического материала по конспектам лекций, учебникам и пособиям;
- самостоятельное изучение теоретических вопросов, выданных студентам в начале семестра;
- решение итоговой контрольной работы.

6.1. Программа самостоятельной работы студентов

6.1.1. Вопросы для самостоятельной оценки качества изучения дисциплины (на них требуется письменный ответ, который сдается в конце семестра):

1. Понятие о квантовом состоянии. Обозначения Дирака бра и кет. Представление скалярного, внешнего (операторов) и тензорного произведений через обозначения Дирака.
2. Базис в квантовой механике. Условие полноты и ортогональность базисных векторов в обозначениях Дирака.
3. Правила перехода от одного базиса к другому. Переход от базиса $|0\rangle, |1\rangle$ к базису $|+\rangle, |-\rangle$.
4. Представление о кубите. Сфера Блоха. Вращение сферы Блоха. Геометрический смысл чистого и смешанного состояний кубита.
5. Физическая реализация кубитов: уровни энергии атомов, проекции спина электрона, поляризация фотона.
6. Матрица плотности чистого состояния. Критерий чистоты состояния. Пример расчета.
7. Матрица плотности смешанного состояния. Пример расчета.

8. Матрица плотности кубита для чистого и смешанного состояний.
9. След матрицы плотности. Частичный след матрицы плотности. Пример расчета.
10. Среднее значение физической величины в обозначениях Дирака и с использованием матрицы плотности.
11. Постулат Борна.
12. Состояние композитной системы. Двухкубитное состояние.
13. Понятие о запутанном состоянии. Молекула водорода как пример системы, находящейся в запутанном состоянии.
14. Базис Белла. Ортогональность.
15. Унитарные операции. Связь Гамильтониана и унитарной операции.
16. Разложение Шмидта базиса Белла.
17. Квантовая суперпозиция и гейт Уолша-Адамара.
18. Схема получения двухкубитного запутанного состояния, используя гейт Адамара.
19. Постоянная и сбалансированная функции.
20. Двоичное исчисление. Обозначение состояний многокубитных систем.
21. Принцип суперпозиции состояний и квантовый параллелизм.
22. Периодические функции, примеры. Преобразования Фурье.
23. Интерференция квантовых состояний.
24. Инвариантность квантового преобразования Фурье относительно сдвига.
25. Унитарность квантового преобразования Фурье.
26. Итерация Гровера. Геометрический смысл.
27. Измерения в различных базисах. Вероятности результатов.
28. Открытый и закрытый ключи шифрования.
29. Невозможность незаметного прослушивания и теорема о запрете клонирования произвольного квантового состояния.
30. Неразличимость неортогональных состояний.
31. Фермионы и бозоны. Статистика. Принцип Паули.

Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы:

1. Львовский, А. Л. Отличная квантовая механика [Электронный ресурс]: учебное пособие. Часть 1 : учебное пособие: В 2 томах / А.Л. Львовский. - Москва : ООО "Альпина нон-фикшн", 2019. - 422 с. ЭБС "Инфра-М".
2. Львовский, А. Л. Отличная квантовая механика [Электронный ресурс]: решения. Часть 2 : учебное пособие: В 2 томах / А.Л. Львовский. - Москва : ООО "Альпина нон-фикшн", 2019. - 304 с. ЭБС "Инфра-М".
3. Стин, Э. Квантовые вычисления [Электронный ресурс] / Стин Эндрю. - Квантовые вычисления, 2023-02-12. - Ижевск : Регулярная и хаотическая динамика, Институт компьютерных исследований, 2019. - 112 с. ЭБС IPR BOOKS.
4. Прилипко, В. К. Физические основы квантовых вычислений. Динамика кубита [Электронный ресурс]: монография / В. К. Прилипко, И. И.

Коваленко. - 1-е изд. - Санкт-Петербург : Лань, 2019. - 216 с. ЭБС «Лань».

5. Основы теории построения квантовых компьютеров и моделирование квантовых алгоритмов [Электронный ресурс]: монография / Гузик В. Ф. - Ростов-на-Дону, Таганрог, Москва : Издательство Южного федерального университета, Физматлит, 2019. - 287 с. ЭБС IPRbooks.
6. Нильсен, М. А. Квантовые вычисления и квантовая информация / М. А. Нильсен, И. Л. Чанг ; пер. с англ. под ред. М. Н. Вялого, П. М. Островского ; с предисл. К. А. Валиева. - Москва : Мир, 2006. - 822 с.
7. Прескилл, Дж. Квантовая информация и квантовые вычисления : [в 2 т.] / Дж. Прескилл ; пер. с англ. Т. С. Нечаева ; под науч. ред. С. С. Епифанова, С. Г. Новокшенова. - Москва ; Ижевск : Ин-т компьютер.исслед. [изд.] : НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2008 - 2011.

6.2. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины

Оценка качества освоения дисциплины включает текущий контроль успеваемости, контрольную работу и промежуточную аттестацию обучающихся студентов.

Промежуточная аттестация по итогам освоения дисциплины проводится в форме *экзамена* в конце седьмого семестра.

Оценочные средства по дисциплине:

6.2.1. Задания для контрольной работы:

К каждому заданию с вариантами выбора ответа даны несколько ответов, из которых нужно выбрать все верные.

1. Какие из квантовых состояний служат единицей квантовой информации:
 - а) чистое состояние
 - б) смешанное состояние
 - в) запутанное состояние
 - г) кубит
2. Запутанное состояние является
 - а) суперпозиционным состоянием частицы с интерференцией волновых функций
 - б) состоянием частиц с нефакторизуемой волновой функцией
 - в) состоянием, в котором результаты измерений над частицами коррелированы
 - г) неприемлемым состоянием, свидетельствующим о недостатках квантовой теории
3. Какие из следующих записей кубита правильны:
 - а) $|q\rangle = |0\rangle + |1\rangle$
 - б) $|q\rangle = |1\rangle + |0\rangle$

в) $|q\rangle = (1/2)|0\rangle - (1/2)|1\rangle$

г) $|q\rangle = (1/\sqrt{3})|0\rangle + (i\sqrt{2}/\sqrt{3})|1\rangle$

4. Какова должна быть длительность импульса T осцилляций с частотой Раби Ω , чтобы кубит перешел из одного базисного состояния в другое?

а) $T = \pi/4\Omega$

б) $T = \pi/2\Omega$

в) $T = \pi/\Omega$

г) $T = 2\pi/\Omega$

5. Какие гейты используются для основной вычислительной операции – сложения :

а) *NOT*

б) *AND*

в) *OR*

г) *XOR*

6. Какие из гейтов не приводят к потере информации:

а) *NOT*

б) *AND*

в) *XOR*

г) *CNOT*

7. Копирование кубита

а) невозможно вследствие запутывания кубита с кубитом для копирования

б) невозможно вследствие разрушения при измерении

в) возможно с разрушением самого кубита

г) невозможно по теореме о неклонированности кубита

8. Квантовый параллелизм достигается применением гейтов

а) дважды контролируемого отрицания

б) Адамара

в) Уолша-Адамара

г) матриц Паули

9. Квантовая телепортация

а) аналогична копированию файла из папки в папку

б) аналогична переносу файла из папки в папку

в) исключает классические каналы связи

г) использует запутанные состояния

10. Абсолютная секретность генерации квантового ключа обеспечивается

а) невозможностью считывания квантового ключа

б) невозможностью скрыть считывание квантового ключа

в) использованием запутанных состояний

г) разрушением считываемого суперпозиционного состояния

11. Квантовое преобразование Фурье является

а) обобщением интегрального преобразования Фурье

б) обобщением разложения непрерывной функции в ряд Фурье

- в) обобщением дискретного преобразования Фурье
 г) оператором выявления скрытой периодичности волновой функции
12. Основным препятствием на пути создания универсального квантового компьютера является
- неклонированность кубитов
 - запутывание кубитов компьютера между собой
 - запутывание кубитов с окружением
 - обратимость квантовых гейтов

13. Принимая матричную запись кубита $|\psi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle = \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = (a \ b)^T$, записать в матричном виде с помощью тензорного произведения трехкубитовое состояние $|100\rangle = |1\rangle \otimes |0\rangle \otimes |0\rangle = |1\rangle|0\rangle|0\rangle$.

14. Перейти от представления в базисе $|0\rangle, |1\rangle$ к базису $|+\rangle, |-\rangle$ для произвольного состояния кубита.

15. Докажите тождество $HXH = Z$

6.2.2. Задания для лабораторных занятий

Лабораторная работа №1. Визуализация состояний кубита в Qiskit.

Перечень заданий, задач, выносимых на лабораторную работу:

В Qiskit, используя `plot_bloch_vector()` или `plot_bloch_vector_spherical()`, постройте визуализацию следующих состояний кубита с помощью сферы Блоха:

- $|0\rangle$.
- $|1\rangle$.
- $\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)$.
- $\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - i|1\rangle)$.
- $\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} i \\ 1 \end{bmatrix}$.

Вопросы для самостоятельной подготовки:

- Что является элементарными единицами классической и квантовой информации? В чем их отличие? Сводимы ли они друг к другу?
- Сколько независимых параметров необходимо для представления комплексного числа? Каково графическое представление комплексного числа?
- Сколько независимых параметров необходимо для описания состояния кубита?
- Какова норма вектора состояния кубита?
- Что такое сфера Блоха?

Лабораторная работа №2. Измерения в различных базисах.

Перечень заданий, задач, выносимых на лабораторную работу:

Используя Qiskit, изобразите вероятность измерения кубита, находящегося в состояниях $|0\rangle$, $|1\rangle$ в состояниях $|+\rangle$ и $|-\rangle$.

Подсказка: используйте `get_counts()` и `plot_histogram()`.

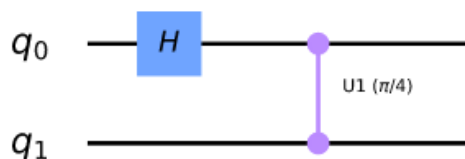
Вопросы для самостоятельной подготовки:

1. Какова формулировка постулата Борна?
2. Какова связь между базисами $|0\rangle$, $|1\rangle$ и $|+\rangle$, $|-\rangle$?
3. Каким точкам на сфере Блоха соответствуют состояния $|0\rangle$, $|1\rangle$ и $|+\rangle$, $|-\rangle$?
4. Какая унитарная операция переводит состояния $|0\rangle$, $|1\rangle$ в $|+\rangle$, $|-\rangle$, соответственно? Каково ее название, символьное обозначение и матричное представление в вычислительном базисе?
5. Каково матричное представление в вычислительном базисе обратной унитарной операции, переводящей $|+\rangle$, $|-\rangle$ в $|0\rangle$, $|1\rangle$?

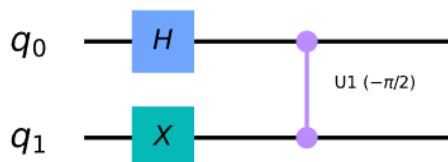
Лабораторная работа №3. Двухкубитные операции с управлением.

Перечень заданий, задач, выносимых на лабораторную работу:

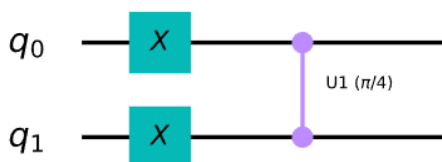
Задание №1. Каким будет результирующее состояние контрольного кубита (q_0), если управляемый кубит (q_1) был в состоянии $|0\rangle$ (как показано на рисунке)? Используйте Qiskit для проверки результата.



Задание №2. Каково было бы состояние контрольного кубита (q_0), если бы управляемый кубит (q_1) был в состоянии $|1\rangle$, и в схеме использовался контролируемый Sdg гейт вместо контролируемого T гейта (как показано на рисунке)?



Задание №3. Каково было бы состояние контрольного кубита (q_0), если бы он был в состоянии $|1\rangle$ вместо состояния $|+\rangle$ перед применением контролируемого T гейта (как показано на рисунке)?



Вопросы для самостоятельной подготовки:

1. Каково матричное представление в вычислительном базисе действия Тгейта?
2. Каково матричное представление в вычислительном базисе действия Sdg гейта?
3. Каково матричное представление двухкубитной операции $CNOT$?
4. Меняется ли для операции $CNOT$ состояние управляемого кубита, если управляющий кубит находится в состоянии $|0\rangle$?
5. Меняется ли для операции $CNOT$ состояние управляемого кубита, если управляющий кубит находится в состоянии $|1\rangle$?

Лабораторная работа №4. Изучение алгоритма Бернштейна-Вазирани.

Перечень заданий, задач, выносимых на лабораторную работу:

Задание №1. Используйте виджет, расположенный ниже, для того, чтобы увидеть действие алгоритма Бернштейна-Вазирани на различных оракулах.

```
fromqiskit_textbook.widgets import bv_widget  
bv_widget(3, "011", hide_oracle=False)
```

Задание №2. В задаче №1 показано применение алгоритма Бернштейна-Вазирани для секретной строки битов $s = 011$. Модифицируйте применение данного алгоритма для случая строк $s = 1011$ и $s = 11101101$. Объясните полученные результаты.

Вопросы для самостоятельной подготовки:

1. Какова вычислительная сложность проблемы Бернштейна-Вазирани с точки зрения классических вычислений?
2. Каков выигрыш в вычислительной сложности проблемы Бернштейна-Вазирани при условии ее решения с помощью квантового подхода?
3. Какова квантовая схема, реализующая алгоритм Бернштейна-Вазирани?

Лабораторная работа №5. Изучение алгоритма Дойча-Йожа.

Перечень заданий, задач, выносимых на лабораторную работу:

Задание №1. Используя Qiskit, промоделируйте алгоритм Дойча-Йожа для 3-х битовой функции.

Вопросы для самостоятельной подготовки:

1. Какова вычислительная сложность проблемы Дойча-Йожа с точки зрения классических вычислений?
2. Каков выигрыш в вычислительной сложности проблемы Дойча-Йожа при условии ее решения с помощью квантового подхода?
3. Какова квантовая схема, реализующая алгоритм Дойча-Йожа?

Лабораторная работа №6. Изучение алгоритма Саймона.

Перечень заданий, задач, выносимых на лабораторную работу:

Задание №1. Используя Qiskit, промоделируйте алгоритм Саймона для случая секретной строки $b = 1001$.

Вопросы для самостоятельной подготовки:

1. Какова вычислительная сложность проблемы Саймона с точки зрения классических вычислений?
2. Каков выигрыш в вычислительной сложности проблемы Саймона при условии ее решения с помощью квантового подхода?
3. Какова квантовая схема, реализующая алгоритм Саймона?

Лабораторная работа №7. Изучение алгоритма Шора по факторизации чисел. Перечень заданий, задач, выносимых на лабораторную работу:

Задание №1. Прodelайте в Qiskit алгоритм Шора по факторизации числа 15, взяв в качестве случайных взаимно простых с 15 чисел следующие числа 2, 8, 11 и 13. Объясните полученные результаты.

Вопросы для самостоятельной подготовки:

1. Какова вычислительная сложность проблемы Шора с точки зрения классических вычислений?
2. Каков выигрыш в вычислительной сложности проблемы Шора при условии ее решения с помощью квантового подхода?
3. Какова квантовая схема, которая реализует квантовую часть алгоритма Шора?

Лабораторная работа №8. Изучение алгоритма Гровера по поиску в неструктурированной базе данных.

Перечень заданий, задач, выносимых на лабораторную работу:

Задание №1. Используя Qiskit, промоделируйте алгоритм Гровера для случаев 2 и 3 кубитов.

Вопросы для самостоятельной подготовки:

1. Какова вычислительная сложность проблемы Гровера с точки зрения классических вычислений?
2. Каков выигрыш в вычислительной сложности проблемы Гровера при условии ее решения с помощью квантового подхода?
3. Какова квантовая схема, реализующая алгоритм Гровера?

6.2.3. Перечень примерных экзаменационных билетов

Экзаменационный билет №1.

1. Кубит. Примеры физической реализации.
2. Ортогонализация Грама-Шмидта.

Экзаменационный билет №2.

1. Понятие гейта. Унитарная операция-связь с физическими моделями.
2. Реализация гейта Тоффоли с помощью универсального набора гейтов.

Экзаменационный билет №3.

1. Обозначения Дирака. Понятие базиса в квантовой механике. Переход от одного базиса к другому.
2. Унитарная трехкубитовая операция – гейт Фредкина.

Экзаменационный билет №4.

1. Фермионы, бозоны. Распределение Ферми-Дирака, распределение Бозе-Эйнштейна.
2. Унитарная трехкубитовая операция – гейт Тоффли.

Экзаменационный билет №5.

1. Итерация Гровера.
2. Унитарная двухкубитная операция CNOT.

Экзаменационный билет №6.

1. Матрица плотности смешанного состояния кубита.
2. Унитарная операция Уолша-Адамара.

Экзаменационный билет №7.

1. Матрица плотности чистого состояния кубита.
2. Унитарная операция Адамара.

Экзаменационный билет №8.

1. Обозначения Дирака. Скалярное произведение.
2. Унитарная операция амплитудного вращения сферы Блоха.

Экзаменационный билет №9.

1. Обозначения Дирака. Среднее значение физической величины.
2. Унитарная операция фазового вращения сферы Блоха.

Экзаменационный билет №10.

1. Обозначения Дирака. Тензорное произведение.
2. Однокубитовый $\pi/8$ гейт. Представление в вычислительном базисе. Геометрический смысл.

Экзаменационный билет №11.

1. Обозначения Дирака: внешнее произведение.
2. Однокубитовый Z гейт. Представление в вычислительном базисе. Геометрический смысл Z гейта.

Экзаменационный билет №12.

1. Обозначения Дирака. Условие полноты.

2. Однокубитовый Угейт. Представление в вычислительном базисе. Геометрический смысл Угейта.

Экзаменационный билет №13.

1. Обозначения Дирака. Условие ортогональности состояний.
2. Однокубитовый Хгейт. Представление в вычислительном базисе. Геометрический смысл Хгейта.

Экзаменационный билет №14.

1. Матрица плотности. Постулаты квантовой механики.
2. Неразличимость неортогональных состояний.

Экзаменационный билет №15.

1. Постулат о квантовом состоянии.
2. Теорема о запрете клонирования.

Экзаменационный билет №16.

1. Протокол BB84.
2. Представление физических величин операторами.

Экзаменационный билет №17.

1. Протокол квантовой телепортации.
2. Постулат о составных квантовых системах.

Экзаменационный билет №18.

1. Матрица плотности смешанного состояния.
2. Разложение Шмидта.

Экзаменационный билет №19.

1. Парадокс ЭПР. Неравенства Белла.
2. Операция взятия частичного следа.

Экзаменационный билет №20.

1. Протокол ЭПР квантового распределения ключей.
2. Запутанные состояния. Квантовая схема, реализующая запутанные состояния.

Экзаменационный билет № 21.

1. Протокол сверхплотного кодирования.
2. Базис Белла. Квантовая схема. Ортогональность.

Экзаменационный билет №22.

1. Алгоритм Дойча-Йожа.
2. Протокол возврата фазы.

Экзаменационный билет №23.

1. Алгоритм Дойча.
2. Квантовый параллелизм.

Экзаменационный билет №24.

1. Правило Борна.
2. Алгоритм Дойча-Йожа.

Экзаменационный билет №25.

1. Криптография с закрытым ключом. Шифр Вернама: одноразовый блокнот.
2. Алгоритм Бернштейна-Вазирани.

Экзаменационный билет №26.

1. Криптография с открытым ключом. Система RSA.
2. Алгоритм Саймона.

Экзаменационный билет №27.

1. Принцип Ландауэра.
2. Классическая часть алгоритма Шора.

Экзаменационный билет №28.

1. Демон Максвелла.
2. Квантовая часть алгоритма Шора.

Экзаменационный билет №29.

1. Схемная модель вычислений.
2. Алгоритм Гровера.

Экзаменационный билет №30.

1. Сложность вычислительных задач. Классы **P** и **NP**.
2. Схема квантового преобразования Фурье.

Экзаменационный билет №31.

1. Обратимые вычисления: информационный мусор и подход Беннета.
2. Булева алгебра. Основные операции.

Экзаменационный билет №32.

1. Сумматор и полный сумматор – логические схемы.
2. Соответствие между классическими и квантовыми вычислительными подходами.

7. Данные для учета успеваемости студентов в БАРС

Таблица 1.1 Таблица максимальных баллов по видам учебной деятельности.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Семестр	Лекции	Лабораторные занятия	Практические занятия	Самостоятельная работа	Автоматизированное тестирование	Другие виды учебной деятельности	Промежуточная аттестация	Итого
7	10	30	0	15	0	15	30	100

Программа оценивания учебной деятельности студента 7 семестр

Лекции

Посещаемость, активность; количество баллов – от 0 до 10.

Критерии оценки:

- менее 1% от числа занятий в семестре – 0 баллов;
- от 1% до 10% от числа занятий в семестре – 1 балл;
- от 11% до 20% – 2 балла;
- от 21% до 30% – 3 балла;
- от 31% до 40% – 4 балла;
- от 41% до 50% – 5 баллов;
- от 51% до 60% – 6 баллов;
- от 61% до 70% – 7 баллов;
- от 71% до 80% – 8 баллов;
- от 81% до 90% – 9 баллов;
- не менее 91% занятий – 10 баллов.

Лабораторные занятия

Посещаемость лабораторных занятий, активность, теоретический отчет по лабораторной работе, самостоятельность при выполнении лабораторной работы, грамотность в оформлении отчета – от 0 до 30 баллов.

Критерии оценки:

При освоении студентом данной части дисциплины на «отлично» необходимо, чтобы студент: <ul style="list-style-type: none"> • выполнил теоретические отчеты по всем заданным лабораторным работам в полном объеме; • посетил не менее 91% от числа занятий в семестре; • выполнил самостоятельно или в группе лабораторную работу, следуя указаниям преподавателя; • оформил отчет о проделанной работе согласно требованиям, предъявляемым к оформлению лабораторных работ; • провел анализ полученного результата и в случае возможности сравнил с его известным теоретическим результатом и объяснил возможные расхождения. 	от 21 до 30 баллов
При освоении студентом данной части дисциплины на «хорошо» необходимо, чтобы студент	от 11 до 20 баллов

<ul style="list-style-type: none"> • не ответил на два-три вопроса при теоретическом отчете по лабораторной работе; • посетил не менее 71% от числа занятий в семестре; • выполнил самостоятельно или в группе лабораторную работу, следуя указаниям преподавателя; • допустил негрубые ошибки при оформлении отчета по лабораторной работе, недочеты или опiski, не повлиявшие на результаты выполнения работы. 	
<p>При освоении студентом данной части дисциплины на «удовлетворительно» необходимо, чтобы студент</p> <ul style="list-style-type: none"> • ответил на большую часть вопросов при теоретическом отчете по лабораторной работе; • посетил не менее 51% от числа занятий в семестре; • выполнил самостоятельно или в группе лабораторную работу, следуя указаниям преподавателя; • оформил отчет по лабораторной работе, но в нем могли быть допущены ошибки, не имеющие принципиального значения. 	от 1 до 10 баллов
<p>При освоении студентом данной части дисциплины на «неудовлетворительно» необходимо, чтобы студент</p> <ul style="list-style-type: none"> • не ответил на большую часть вопросов при теоретическом отчете по лабораторной работе; • посетил менее 51% от числа занятий в семестре; • неверно промоделировал поставленную в лабораторной работе задачу; • некорректно или вовсе не оформил отчет по лабораторной работе. 	0 баллов

Практические занятия

Не предусмотрены.

Самостоятельная работа

Выполнение заданий, выданных в начале семестра; количество баллов – от 0 до 15 баллов.

Критерии оценки:

- при полностью правильном и своевременном выполнении студентом заданий – 15 баллов;
- при частично правильном выполнении (правильно выполненных заданий – не менее 70%) – от 8 до 12 баллов;
- в остальных случаях – 0 баллов.

Автоматизированное тестирование

Автоматизированное тестирование не предусмотрено.

Другие виды учебной деятельности

Выполнение контрольной работы.

Выполнение заданий контрольной работы будет оцениваться в баллах по шкале от 0 до 15 баллов.

Критерии оценки:

- при полном правильном выполнении заданий контрольной работы – 15 баллов;
- при правильном выполнении более 80%, но менее 100% заданий контрольной работы – 10-14 баллов;
- при правильном выполнении от 50% до 80% заданий контрольной работы – 7-9 баллов;
- при правильном выполнении более 10%, но менее 50% заданий контрольной работы – 3-6 баллов;
- в остальных случаях – 0 баллов.

Промежуточная аттестация – экзамен

Форма промежуточной аттестации в седьмом семестре – *экзамен*; количество баллов – от 0 до 30 баллов.

Экзамен проводится в устной форме в виде ответов на вопросы билета и три дополнительных вопроса по разным разделам данной дисциплины. Билет содержит два вопроса из перечня вопросов к промежуточной аттестации.

Критерии оценки ответа на каждый вопрос при проведении промежуточной аттестации:

- на вопрос дан правильный, полный, развернутый ответ (допускаются незначительные погрешности) – 6 баллов;
- на вопрос дан правильный, но неполный ответ (например, при объяснении явления, изложении метода имеются отдельные логические недочеты; допущена ошибка при вычислении; имеются другие неточности) – 4-5 баллов;
- на вопрос дан краткий ответ, содержащий только верно сформулированные факты (допускаются незначительные погрешности) – 3 балла;
- в остальных случаях – 0 баллов.

При проведении промежуточной аттестации

ответ на «отлично» оценивается от 21 до 30 баллов;

ответ на «хорошо» оценивается от 11 до 20 баллов;

ответ на «удовлетворительно» оценивается от 6 до 10 баллов;

ответ на «неудовлетворительно» оценивается от 0 до 5 баллов.

Форма проведения текущей аттестации для студентов-инвалидов устанавливается с учетом индивидуальных психофизических особенностей (устно, письменно на бумаге и т.п.). При необходимости студенту-инвалиду предоставляется дополнительное время для подготовки ответа на экзамене.

Таким образом, максимально возможная сумма баллов за все виды учебной деятельности студента за седьмой семестр по дисциплине «Введение в теорию квантовых компьютеров» составляет **100** баллов.

Таблица 2.2 Таблица пересчета полученной студентом суммы баллов по дисциплине «Введение в теорию квантовых компьютеров» в оценку (экзамен):

86-100 баллов	«отлично»
70-85 баллов	«хорошо»
50-69 баллов	«удовлетворительно»
0-49 баллов	«не удовлетворительно»

8. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины «Введение в теорию квантовых компьютеров»

а) литература:

1. Львовский, А. Л. Отличная квантовая механика [Электронный ресурс]: учебное пособие. Часть 1 : учебное пособие: В 2 томах / А.Л. Львовский. - Москва : ООО "Альпина нон-фикшн", 2019. - 422 с. URL: <https://znanium.com/catalog/document?pid=1221824&id=368791> ЭБС "Инфра-М".
2. Львовский, А. Л. Отличная квантовая механика [Электронный ресурс]: решения. Часть 2 : учебное пособие: В 2 томах / А.Л. Львовский. - Москва : ООО "Альпина нон-фикшн", 2019. - 304 с. URL: <http://znanium.com/catalog/document/?pid=1222049&id=368826> ЭБС "Инфра-М".
3. Стин, Э. Квантовые вычисления [Электронный ресурс] / Стин Эндрю. - Квантовые вычисления, 2023-02-12. - Ижевск : Регулярная и хаотическая динамика, Институт компьютерных исследований, 2019. - 112 с. URL: <https://www.iprbookshop.ru/92042.html> ЭБС IPR BOOKS.
4. Прилипко, В. К. Физические основы квантовых вычислений. Динамика кубита [Электронный ресурс]: монография / В. К. Прилипко, И. И. Коваленко. - 1-е изд. - Санкт-Петербург : Лань, 2019. - 216 с. URL: <https://e.lanbook.com/book/111888> ЭБС «Лань».
5. Основы теории построения квантовых компьютеров и моделирование квантовых алгоритмов [Электронный ресурс]: монография / Гузик В. Ф. - Ростов-на-Дону, Таганрог, Москва : Издательство Южного федерального университета, Физматлит, 2019. - 287 с. URL: <http://www.iprbookshop.ru/96275.html> ЭБС IPRbooks.
6. Березкин, Е. Ф. Основы теории информации и кодирования [Электронный ресурс]: учебное пособие / Е. Ф. Березкин. - 2-е изд., испр. - Санкт-Петербург : Лань, 2018. - 320 с. - URL: <https://e.lanbook.com/book/108326https://e.lanbook.com/img/cover/book/108326.jpg> ЭБС «Лань».
7. Попов, И. Ю. Теория информации [Электронный ресурс]: учебник / И. Ю. Попов, И. В. Блинова. - Санкт-Петербург : Лань, 2020. - 160 с. - URL: <https://e.lanbook.com/book/126940https://e.lanbook.com/img/cover/book/126940.jpg> ЭБС «Лань».
8. Майстренко, Н. В. Основы теории информации и криптографии [Электронный ресурс]: учебное пособие / Майстренко Н. В. - Тамбов : Тамбовский государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2018. - 81 с. - URL: <http://www.iprbookshop.ru/94362.html> ЭБС IPRbooks.
9. Белоус, А. И. Кибероружие и кибербезопасность. О сложных вещах простыми словами [Электронный ресурс]: учебное пособие / Белоус А. И. - Москва, Вологда : Инфра-Инженерия, 2020. - 692 с. - URL: <http://www.iprbookshop.ru/98349.html> ЭБС IPRbooks.

б) программное обеспечение и Интернет-ресурсы:

Свободное программное обеспечение:

1. Программная оболочка для программирования на квантовом компьютере: IBMQuantum. Start coding with Python in Quantum Lab <https://quantum-computing.ibm.com/lab>
2. Qiskit – платформа квантовых вычислений с открытым кодом.
3. Язык программирования Python.

Интернет-ресурсы:

1. Большая научная библиотека. <http://sci-lib.com/>
2. Научная электронная библиотека. <http://www.elibrary.ru/>
3. Библиотека СГУ. <http://library.sgu.ru/>
4. Интернет-ресурс: «Мир математических уравнений». <http://eqworld.ipmnet.ru/indexr.htm>
5. Сайт «Видеолекции и открытые образовательные материалы Физтеха». <http://lectoriy.mipt.ru/>
6. Федичкин Л.Е. Квантовые вычисления. Лекции. <https://www.youtube.com/watch?v=mDh0ceuPKMQ>
7. Сайт «КвантТех». Лекции. <https://www.youtube.com/channel/UCG4xUueHDvYZ1EP2HGHeS-Q/videos>
8. Никитин Н.В. Принципиальные вопросы квантовой механики. Лекции. <http://nuclphys.sinp.msu.ru/pqm/index.html>
9. Рубцов А.Н., Страупе С.С. Введение в квантовую физику. Лекции. <https://teach-in.ru/course/introduction-to-quantum-physics-lectures-rubtsov>
10. Физические основы квантовой информации. Лекции. <https://studizba.com/lectures/73-fizika/1079-fizicheskie-osnovy-kvantovoy-informacii/>
11. Трушечкин А.С. Квантовые вычисления. Лекции. <https://www.youtube.com/playlist?list=PLUbD59ZHv1GTNTII9Gdx2Np3DDd7hta-q>
12. Трушечкин А.С., Кронберг Д.А. Математические основы квантовой криптографии. Лекции. <https://www.youtube.com/playlist?list=PLUbD59ZHv1GRzz6dsQ4fvH1evxqK4qkI0>
13. Russian Quantum Center / RQC .Лекции. <https://www.youtube.com/channel/UCpOG8wlozPr6qXnO3kGoIxQ>
14. Сайт «Неравенства Белла» http://www.eslitak.com/index/neravenstva_bella/0-17

9. Материально-техническое обеспечение дисциплины «Введение в теорию квантовых компьютеров»

Учебная и монографическая литература, научные статьи, открытые стандарты кодирования, открытые библиотеки исходных кодов с реализацией современных алгоритмов, компьютерные демонстрационные программы, электронные лекции (презентации).

Компьютерный класс института физики (ауд. 307 и 308 8-го учебного корпуса). Помещения соответствуют действующим санитарным и противопожарным нормам, а также требованиям техники безопасности и

охраны труда при проведении учебных, научно-исследовательских и научно-производственных работ.

Персональные ЭВМ, объединенные в локальную сеть и с выходом в Интернет.

Мультимедиапроектор.

Практическая подготовка в рамках занятий осуществляется на кафедре общей, теоретической и компьютерной физики.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению 03.03.02 «Физика» профиль «Компьютерные технологии в медицинской физике».

Авторы: к.ф.-м.н., доцент

Чурочкин Д.В.

Программа одобрена на заседании кафедры общей физики от 27 мая 2022 года, протокол № 10.