Федеральное государственное бюджетное образовательное

учреждение высшего образования
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

*Факультет фундаментальной физико-химической инженерии*

УТВЕРЖДАЮ

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_/

«\_\_\_» \_\_\_\_\_\_\_\_\_ 2023 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)**

Наименование дисциплины (модуля):

*Межфакультетский курс «Основы обработки квантовой информации»*

Уровень высшего образования:

*специалисты 5–6 курса или магистратура любого курса*

Направление подготовки / специальность:

**Для студентов естественно-научных специальностей**

Направленность (профиль)/специализация ОПОП:

Форма обучения:

*очная*

Рабочая программа рассмотрена и одобрена

Методической комиссией факультета

(протокол №\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_, от )

г. Москва, 2024

**Целью** дисциплины “Введение в квантовые вычисления” является содействие формированию и развитию у студентов универсальных и профессиональных компетенций, посредством приобретения знаний теоретических основ квантовых вычислений и принципов работы квантовых платформ, а также базовых умений создания и выполнения квантовых алгоритмов на современных квантовых компьютерах.

**Задачи изучаемой дисциплины:**

* Создать чёткое представление о квантовых вычислениях – истории, современном состоянии и путях развития данного направления;
* Сформировать понимание о границах эффективного применения квантовых вычислений на основе фундаментальных аспектов работы квантовых платформ;
* Заложить представления о принципах работы базовых и передовых квантовых алгоритмов;
* Познакомить студентов с основными современными достижениями в области квантовых вычислений;
* Способствовать развитию у студентов целостных представлений о практическом применении квантовых вычислений в современных научных исследованиях;
* Основываясь на теоретических представлениях о принципах работы квантовых платформ создать необходимую научно-теоретическую базу для изучения и создания квантовых алгоритмов;

# 1.Место дисциплины (модуля) в структуре ОПОП ВО

Относится к вариативной части, является дисциплиной по выбору.

# 2. Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия (если есть)

«линейная алгебра», «теория вероятностей и математическая статистика», «информатика и программирование»

#

# 3. Результаты обучения по дисциплине (модулю)

| **Формируемые компетенции****(код компетенции)** | **Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю)** |
| --- | --- |
| **УК-1.** Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий, формулировать научно обоснованные гипотезы, применять методологию научного познания в профессиональной деятельности. | УМЕТЬ анализировать альтернативные варианты решения исследовательских задач в области физики квантовых вычислений и оценивать потенциальные выигрыши/проигрыши реализации этих вариантов. ЗНАТЬ основные методы решения исследовательских и практических задач в области физики квантовых вычислений. |
| **ОПК-1.** Способен применять фундаментальные знания в области физики для решения научно-исследовательских задач. | УМЕТЬ оценивать адекватность применяемых моделей и методов теории квантовых вычислений. |
| **ОПК-4.** Способен использовать профессионально-профилированные знания в области компьютерных технологий для решения задач профессиональной деятельности, в том числе и междисциплинарного характера. | ЗНАТЬ основные понятия в области квантовых вычислений. УМЕТЬ создавать квантовые схемы для решения задач из области квантовых вычислений. |
| **ПК-1.** Способен применять знания в области физики при проведении исследовательских работ, направленных на решение актуальных вопросов современной науки. | УМЕТЬ воспроизводить и оценивать, основываясь на основных тенденциях развития дисциплины, методы проведения квантовых вычислений. |
| **ПК-3.** Способен применять знание разделов физики в инновационной научной деятельности. | УМЕТЬ формулировать задачу квантовых вычислений исходя из общей научной проблемы. |

# 4. Объем дисциплины (модуля) составляет 1 з.е. в том числе 24 академических часов на контактную работу обучающихся с преподавателем, 12 академических часов на самостоятельную работу обучающихся.

# 5. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий:

## 5.1. Структура дисциплины (модуля) по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий (в строгом соответствии с учебным планом)

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Наименование разделов и тем дисциплины (модуля), Форма промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)** | **Номинальные трудозатраты обучающегося** | **Всего академических часов** | **Форма текущего контроля успеваемости\* (наименование)** |
| **Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем) Виды контактной работы академические часы** | **Самостоятельная работа обучающегося, академические часы** |
| **Занятия лекционного типа** | **Занятия семинарского типа** |
| Введение. | 2 | - | 2 | 4 | КР, ДЗ |
| Квантовые состояния и операции над ними. | 7 | - | 4 | 11 | КР, ДЗ |
| Квантовые алгоритмы. | 7 | - | 4 | 11 | КР, ДЗ |
| Квантовое моделирование. | 2 | - | 1 | 3 | КР, ДЗ |
| Квантовая коммуникация и квантовая криптография. | 2 | - | 1 | 3 | КР, ДЗ |
| Физическая реализация квантовых компьютеров. | 2 | - | - | 2 | ДЗ |
| Промежуточная аттестация – зачет |  |  |  | 2 | Зачет  |
| **Итого** | 22 | - | 12 | 36 | - |

*\* КР - контрольная работа; ДЗ – домашнее задание*

## 5.2. Содержание разделов (тем) дисциплины

| № | Наименование разделов дисциплины | Содержание разделов дисциплин |
| --- | --- | --- |
| 1 | Введение. | История квантовой информации и квантовых вычислений. Носители квантовой информации – кубиты. Понятие запутанности. |
| 2 | Квантовые состояния и операции над ними. | Квантовые схемы. Операции на одном кубите. Сфера Блоха. Условные операции. Белловское (ЭПР) состояние. Измерение. Импульсные последовательности. |
| 3 | Квантовые алгоритмы. | Ускорение решения NP-полных задач. Алгоритм Гровера. Алгоритм Дойча-Йожи. Коррекция ошибок. “Шумный” квантовый компьютер. Гибридные алгоритмы. Вариационные квантовые алгоритмы (VQE). Квантовое машинное обучение. |
| 4 | Квантовое моделирование. | Декомпозиция Троттера. Квантовая химия. Основное состояние. Электронная структура. |
| 5 | Квантовая коммуникация и квантовая криптография. | Tелепортация. Сверхплотное кодирование. Протоколы распределения квантовых ключей (BB84). |
| 6 | Физическая реализация квантовых компьютеров. | ЯМР. Сверхпроводящие квантовые цепи. Холодные атомы. Холодные ионы. Квантовые точки. NV-центры в алмазах. |

# 6. Фонд оценочных средств (ФОС, оценочные и методические материалы) для оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю).

## 6.1. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения текущего контроля успеваемости, критерии и шкалы оценивания (в отсутствие утвержденных соответствующих локальных нормативных актов на факультете)

**Примерный вариант письменной контрольной работы**

1. Построить квантовую схему для создания беловского состояния.
2. Найдете тензорное произведение матриц Паули $σ\_{x}⊗σ\_{z}$.
3. Упростите квантовую схему.


**Примерный вариант домашнего задания:**

* Получить оценку для числа $π$ на симуляторе квантового компьютера используя квантовую схему из работы Bochkin, G.A., Doronin, S.I., Fel’dman, E.B. et al. Calculation of 𝜋 on the IBM quantum computer and the accuracy of one-qubit operations. Quantum Inf Process 19, 257 (2020). https://doi.org/10.1007/s11128-020-02759-6.

## 6.2. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения промежуточной аттестации по дисциплине (модулю), критерии и шкалы оценивания (в отсутствие утвержденных соответствующих локальных нормативных актов на факультете)

1. Однокубитные преобразования.
2. Схема копирования кубита.
3. Типы шумовых воздействий на кубиты. Понятие декогеренции. «Шумный» квантовый компьютер.
4. Алгоритм Дойча-Йожи. Достижение квантового превосходства.
5. Алгоритм Гровера. Достижение квантового превосходства.
6. Квантовое моделирование. Декомпозиция Троттера.
7. Основное состояние молекулы водорода.
8. Протокол BB84.

# 7. Ресурсное обеспечение

## 7.1. Перечень основной литературы

1. Нильсен М., Чанг Н. Квантовые вычисления и квантовая информация. М.: Мир. 2006. 824с.
2. Холево А. С. Квантовые системы, каналы, информация. МЦНМО, 2010, 328с.
3. Перри. Элементарное введение в квантовые вычисления. Издательский дом Интелмат. Долгопрудный, 2015, 2013 с.
4. А. Китаев, А. Шень, М. Вялый КЛАССИЧЕСКИЕ И КВАНТОВЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ

## 7.2. Перечень дополнительной литературы

1. Wallach N. R. Quantum computing and entanglement for mathematicians. Yecture on quantum computing. Venice CEMI. Yune 2004.
2. D.A.Lidar, T.A.Brunn, Quantum Error Correction, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2013
3. S. Arora, B. Barak, Computational Complexity: A Modern Approach, Princeton University (http://www.cs.princeton.edu/theory/complexity/) Статьи
4. Abu-Nada, A. (2021). Quantum computing simulation of the hydrogen molecular ground-state energies with limited resources. Open Physics, 19(1), 628-633. https://doi.org/10.1515/phys-2021-0071
5. Quantum machine learning Jacob Biamonte, Peter Wittek, Nicola Pancotti, Patrick Rebentrost, Nathan Wiebe & Seth Lloyd Nature volume 549, pages195–202 (2017)
6. Variational quantum algorithms M. Cerezo, et al. Nature Reviews Physics volume 3, pages625–644 (2021)
7. G. Wendin. Quantum Information Processing with Superconducting Circuits: a Review. Reports on Progress in Physics 80, 10 (2017)
8. L. Childress, R. Hanson. Diamond NV centers for quantum computing and quantum networks. MRS Bulletin 38, 2 (2013)
9. H Haeffner, et al. Quantum computing with trapped ions. Physics Reports 469, 4, 155-203 (2008)
10. M. Saffman, T. G. Walker, K. Molmer. Quantum information with Rydberg atoms. Rev. Mod. Phys. 82, 2313 (2010)
11. L. Childress, R. Hanson. Diamond NV centers for quantum computing and quantum networks. MRS Bulletin 38, 2 (2013)
12. C. Hempel, C. Maier, J. Romero, J. McClean, T. Monz, H. Shen, P. Jurcevic, B. P. Lanyon, P. Love, R. Babbush, A. Aspuru-Guzik, R. Blatt, C. F. Roos. Quantum Chemistry Calculations on a Trapped-Ion Quantum Simulator. Phys. Rev. X 8, 031022 (2018)
13. C. Jones, M. A. Fogarty, A. Morello, M. F. Gyure, A. S. Dzurak, T. D. Ladd. Logical Qubit in a Linear Array of Semiconductor Quantum Dots. Phys. Rev. X 8, 021058 (2018)
14. Bibek Pokharel and Daniel A. Lidar. Demonstration of Algorithmic Quantum Speedup Phys. Rev. Lett. 130, 210602 (2023)

## 7.3. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»

1. https://www.ibm.com/topics/quantum-computing
2. https://qiskit.org/learn/
3. https://qiskit.org/documentation/tutorials.html
4. https://www.qmunity.tech/tutorials/an-introduction-to-pennylane

## 7.4. Описание материально-технического обеспечения

Занятия проводятся в аудиториях, оснащенных персональными компьютерами и мультимедийным проектором.

# 8. Таблица с критериями оценки

* Перечень компетенций: УК-1, ОПК-1, ОПК-4, ПК-1, ПК-3.
* Описание шкал оценивания: зачёт со шкалой «неудовлетворительно/удовлетворительно/хорошо/отлично».
* Критерии и процедуры оценивания результатов обучения дисциплине, характеризующих этапы формирования компетенций.

## 8.1. Шкала оценочных средств для аттестации по курсу «Введение в квантовые вычисления»

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Планируемые результаты обучения\* (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)** | **2** **Неудовл.** **(не зачтено)** | **3** **Удовл. (зачтено)** | **4** **Хорошо (зачтено)** | **5** **Отлично (зачтено)** | **Оценочные средства** |
| **(УК-1.) УМЕТЬ** анализировать альтернативные варианты решения исследовательских задач в области физики квантовых вычислений и оценивать потенциальные выигрыши/проигрыши реализации этих вариантов. | Фрагментарное проявление умения анализировать альтернативные варианты решения исследовательских задач в области физики квантовых вычислений и оценивать потенциальные | В целом успешное, но не систематическое проявление умения анализировать альтернативные варианты решения исследовательских задач в области физики квантовых вычислений и оценивать потенциальные | В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы проявление умения анализировать альтернативные варианты решения исследовательских задач в области физики квантовых вычислений и оценивать потенциальные | Сформированные умения анализировать альтернативные варианты решения исследовательских задач в области физики квантовых вычислений и оценивать потенциальные | Индивидуальное собеседование, устные ответы на вопросы, письменные ответы на вопросы контрольной и домашней работ |
| **(УК-1.) ЗНАТЬ** основные методы решения исследовательских и практических задач в области физики квантовых вычислений. | Фрагментарное проявление знаний основных методов решения исследовательских и практических задач в области физики квантовых вычислений | В целом успешное, но не систематическое проявление знаний основных методов решения исследовательских и практических задач в области физики квантовых вычислений | В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы проявление знаний основных методов решения исследовательских и практических задач в области физики квантовых вычислений | Сформированные систематические знания основных методов решения исследовательских и практических задач в области физики квантовых вычислений | Индивидуальное собеседование, устные ответы на вопросы, письменные ответы на вопросы контрольной и домашней работ |
| **(ОПК-1.) УМЕТЬ** оценивать адекватность применяемых моделей и методов теории квантовых вычислений. | Фрагментарное проявление умения оценивать адекватность применяемых моделей и методов теории квантовых вычислений. | В целом успешное, но не систематическое проявление умения оценивать адекватность применяемых моделей и методов теории квантовых вычислений. | В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы проявление умения оценивать адекватность применяемых моделей и методов теории квантовых вычислений. | Сформированные умения оценивать адекватность применяемых моделей и методов теории квантовых вычислений. | Индивидуальное собеседование, устные ответы на вопросы, письменные ответы на вопросы контрольной и домашней работ |
| **(ОПК-4.) ЗНАТЬ** основные понятия в области квантовых вычислений. | Фрагментарное проявление знаний основных понятия в области квантовых вычислений. | В целом успешное, но не систематическое проявление знаний основных понятия в области квантовых вычислений. | В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы проявление знаний основных понятия в области квантовых вычислений. | Сформированные систематические знания основных понятия в области квантовых вычислений. | Индивидуальное собеседование, устные ответы на вопросы, письменные ответы на вопросы контрольной и домашней работ |
| **(ОПК-4.)** **УМЕТЬ** создавать квантовые схемы для решения задач из области квантовых вычислений. | Фрагментарное проявление умения создавать квантовые схемы для решения задач из области квантовых вычислений | В целом успешное, но не систематическое проявление умения создавать квантовые схемы для решения задач из области квантовых вычислений | В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы проявление умения создавать квантовые схемы для решения задач из области квантовых вычислений | Сформированные умения создавать квантовые схемы для решения задач из области квантовых вычислений | Индивидуальное собеседование, устные ответы на вопросы, письменные ответы на вопросы контрольной и домашней работ |
| **(ПК-1.) УМЕТЬ** воспроизводить и оценивать, основываясь на основных тенденциях развития дисциплины, методы проведения квантовых вычислений. | Фрагментарное проявление умения воспроизводить и оценивать, основываясь на основных тенденциях развития дисциплины, методы проведения квантовых вычислений. | В целом успешное, но не систематическое проявление умения воспроизводить и оценивать, основываясь на основных тенденциях развития дисциплины, методы проведения квантовых вычислений. | В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы проявление умения воспроизводить и оценивать, основываясь на основных тенденциях развития дисциплины, методы проведения квантовых вычислений. | Сформированные умения воспроизводить и оценивать, основываясь на основных тенденциях развития дисциплины, методы проведения квантовых вычислений. | Индивидуальное собеседование, устные ответы на вопросы, письменные ответы на вопросы контрольной и домашней работ |
| (**ПК-3.) УМЕТЬ** формулировать задачу квантовых вычислений исходя из общей научной проблемы. | Фрагментарное проявление умения формулировать задачу квантовых вычислений исходя из общей научной проблемы. | В целом успешное, но не систематическое проявление умения формулировать задачу квантовых вычислений исходя из общей научной проблемы. | В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы проявление умения формулировать задачу квантовых вычислений исходя из общей научной проблемы. | Сформированные умения формулировать задачу квантовых вычислений исходя из общей научной проблемы. | Индивидуальное собеседование, устные ответы на вопросы, письменные ответы на вопросы контрольной и домашней работ |

# 9. Язык преподавания: русский

# 10. Разработчик программы

Разработчик программы: к.ф.-м.н. Лазарев Илья Дмитриевич.