Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
ФИЛИАЛ МГУ В Г. ДУБНЕ

УТВЕРЖДАЮ

И.о. директора

филиала МГУ в г. Дубне

_____/ Э.Э. Боос /

«01» сентября 2025г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

Наименование дисциплины:

Квантовые вычисления

Уровень высшего образования:

Магистратура

Направление подготовки / специальность:

01.04.02 «Прикладная математика и информатика»

Направленность (профиль) ОПОП:

Методы и технологии обработки данных в гетерогенных вычислительных средах

Форма обучения:

очная

Дубна 2025

Рабочая программа дисциплины (модуля) разработана в соответствии с самостоятельно установленным МГУ образовательным стандартом (ОС МГУ) для реализуемых основных профессиональных образовательных программ высшего образования по направлению подготовки 01.04.02 "Прикладная математика и информатика" программы магистратуры в редакции приказа МГУ от _____20__ г.

1. Место дисциплины (модуля) в структуре ОПОП ВО:
Дисциплина относится к вариативной части ОПОП ВО.

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

3. Результаты обучения по дисциплине (модулю):

Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю)		
Содержание и код компетенции.	**Индикатор (показатель) достижения компетенции**	**Планируемые результаты обучения по дисциплине, сопряженные с индикаторами достижения компетенций**
СПК-2. Способность понимать и применять в исследовательской и прикладной деятельности современные суперкомпьютерные технологии, математический аппарат, вычислительные методы для проведения крупномасштабного математического моделирования и обработки данных на современных высокопроизводительных вычислительных системах	СПК-2.1. Применяет в исследовательской и прикладной деятельности современные суперкомпьютерные технологии, математический аппарат, вычислительные методы для проведения крупномасштабного математического моделирования и обработки данных на современных высокопроизводительных вычислительных системах	**Знать** Основы квантовой механики Гейты и их реализация **Уметь** Использовать конечномерные модели квантовой электродинамики: Джейнса-Каммингса, Та-виса-Каммингса, Дика, джейнса-Каммингса-Хаббарда. для расчетов с помощью этих моделей в приближении вращающейся волны **Иметь практический опыт** Разработки и анализа моделей квантовой электродинамики
СПК-3. Способность разрабатывать гетерогенные вычислительные среды для решения научных задач крупных проектов, включая проекты класса мегасайенс.	СПК-3.1. Разрабатывает гетерогенные вычислительные среды для решения научных задач крупных проектов, включая проекты класса мегасайенс.	**Знать** Квантовые вычисления и квантовые вычисления с оракулом Открытые квантовые системы **Уметь** Создавать модели квантовой томографии, основанной на измерениях в специально выбранных базисах для применения этого метода для малокубитной системы. **Иметь практический опыт** Приложения квантовой информатики к организации защищенного доступа к данным и организации атак на RSA протокол с помощью алгоритма Шора.

4. Объем дисциплины составляет 3 з.е., в том числе 72 академических часов, отведенных на контактную работу обучающихся с преподавателем, 36 академических часов на самостоятельную работу обучающихся.

5. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды 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			
Тема 1. Основы квантовой механики	4	4	2	10	опрос
Тема 2. Гейты и их реализация.	4	4	4	12	опрос
Тема 3. Квантовые вычисления и квантовые вычисления с оракулом	4	4	6	14	опрос
Тема 4. Открытые квантовые системы	4	4	6	14	опрос
Тема 5. Конечномерные модели КЭД	4	4	6	14	опрос
Тема 6. Квантовая нелокальность	4	4	4	12	опрос
Тема 7. Квантовые измерения	4	4	4	12	опрос
Тема 8. Дополнительные темы	4	4	2	10	опрос
Тема 9. Решение контрольных заданий	4	4	2	10	опрос
Другие виды самостоятельной работы (отсутствуют)	—	—			—
Промежуточная аттестация (экзамен)					
Итого	*36*	*36*	*36*	108	—

5.2. Содержание разделов (тем) дисциплины

№ п/п	Наименование разделов (тем) дисциплины	Содержание разделов (тем) дисциплин
1.	Тема 1. Основы квантовой механики	Кратко даются основные понятия квантовой механики.
2.	Тема 2. Гейты и их реализация	Описываются простейшие гейты, нужные для построения квнатового компьютера: однкубитные, CNOT, Csign, Toffoli и их реализации на зарядовых состояниях электронов.
3.	Тема 3. Квантовые вычисления и квантовые вычисления с оракулом	Рассматриваются квантовые вычисления на чистых состояниях и квантовые оракулы. Разбирается различная запись квантовых вычислений, в частности, их представление в виде quantum gate array – на примере квантового преобразования Фурье
4.	Тема 4. Открытые квантовые системы	Рассказывается о концепции открытой квантовой системы и разбираются ее описания с помощью операторов Крауса и уравнения Линдблада. Рассматриваются частные случаи систем, которые можно трактовать как открытые. Описание дается в терминах матриц плотности смешанных со-стояний.
5.	Тема 5. Конечномерные модели КЭД	QoS, главный поток, фоновые задачи, DispatchQueue. Обработка view в главном потоке. Рассматриваются конечномерные модели квантовой электродинамики: Джейнса-Каммингса, Та-виса-Каммингса, Дика, джейнса-Каммингса-Хаббарда. Описываются методы рассчетов с помощью этих моделей в приближении вращающейся волны.
6.	Тема 6. Квантовая нелокальность	Разбирается эксперимент Алана-Цайлингера с би-фотонами, и нарушение неравенства Белла. Дается интерпретация данного феномена как квантовой нелокальности. Обсуждается соотношение с теорией относительности.
7.	Тема 7. Квантовые измерения	Дается описание квантовой томографии, основанной на измерениях в специально выбранных базисах. Обсуждаются применения этого метода на примере малокубитной системы.
8.	Тема 8. Дополнительные темы	Приложения квантовой информатики к организации защищенного доступа к данным и организации атак на RSA протокол с помощью алгоритма Шора.
9.	Тема 9. Решение контрольных заданий	Решение контрольных заданий по темам.

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

Примеры тем для устного опроса:

1. Общий вид однокубитового унитарного оператора.
2. Определение возможности одновременного измерения по двум наблюдаемым, заданным эрмитовыми матрицами.
3. Связь разложения Шмидта двух-кубитных состояний и SVD- разложения матрицы.
4. Свойства матрицы плотности.
5. Чистые и смешанные состояния одного кубита в терминах сферы Блоха.
6. Распознавание запутывающих двух-кубитных унитарных операторов.
7. Вычисление тензорного произведения операторов.
8. Квантовое преобразование Фурье в случае одного и двух кубитов. Приближенное квантовое преобразование Фурье и его сложность. Связь дискретного и непрерывного преобразования Фурье с квантовой версией.
9. Переход от координатного базиса к импульсному в пространстве одной одномерной и одной двумерной частицы.
10. Алгоритм Гровера в случае известного числа решений. Сложность по сравнению с классическим перебором.
11. Алгоритм Гровера в случае неизвестного числа решений. Реализация алгоритма Гровера для двух кубитов.
12. Решение уравнения Шредингера на квантовом компьютере. Оценка числа требуемых кубитов.
13. Конструирование массива квантовых гейтов, реализующих алгоритм Гровера для 3 кубитов.
14. Возможность применения программы численного нахождения основного состояния при заданном потенциале по диффузионному методу Монте-Карло для нахождения первого возбужденного состояния: развернутое объяснение.
15. Сравнение устойчивости запутанных состояний разных типов запутанных состояний 3 кубитов к ошибкам общего вида. Коррекция таких ошибок, возникающих для стационарного состояния. Метод коррекции ошибок, возникающих в ходе квантового вычисления.
16. Границы возможностей для распараллеливания квантовых эволюций. Квантовый аналог GMSP – проблемы.

6.2. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения промежуточной аттестации по дисциплине, критерии и шкалы оценивания

Вопросы к экзамену

1) Простанства состояний — классическое и квантовое. Дискретизация.

2) Собственные функции и собственные значения операторов координаты, импульса и энергии.

3) Решение уравнения Шредингера для одного и двух-кубитных эволюций. Общее решение задачи Коши для него. Описание решений на языке собственных функций Гамильтониана.
4) Решение уравнения Линдблада для одного и двух атомов в одномодовом поле резонатора.
5) Определение степени запутанности двух-кубитных состояний.
6) Сравнение смешанных состояний по степени запутанности. Вычисление квантовой энтропии. Вычисление результата частичного из-мерения матрицы плотности.
7) Быстрые квантовые алгоритмы.
8) Определение запутанности квантовых состояний, получаемых в квантовых вычислениях.
Вычислительные задачи на основе конечномерных моделей КЭД.
Учащиеся решают вычислительную задачу на основе модели Тависа-Каммингса или Джейнса-Каммингса-Хаббарда следующих типов.
4) Определить стабилизатор данного состояния при фотонной релаксации в полости.
5) Найти динамический стабилизатор при условии контакта оптической полости с фотонным одномодовым термостатом.
6) Выяснить характер оптической проводимости графа из полостей, соединенных оптическим волокном.
7) Найти собственные функции и спектр для трех-атомного состояния в резонаторе.
8) Выяснить вид темных состояний для 6 атомов в полости с вакуумным состоянием поля.
9) Исследовать на оптическую проводимость систему двух полостей с 4 атомами.

Примерные темы семинарских заданий

1. Численное решение краевой задачи Коши для уравнения Шредингера для одномерной частицы в бесконечно глубокой потенциальной яме ширины L\pi при начальном распределении амплитуд f(0,x), и найти константу нормировки c:

Примерные варианты заданий:

1. f(0,x)=-c sin(2x)
2. f(0,x)=c sin(3x)
3. f(0,x)=c sin^2(x)
4. f(0,x)=c sin^2(4x)

2. Вычисление относительной матрицы плотности - для первого кубита, если задано двух-кубитное состояние вида

1. 0.5 (|01> -|00>+|10>-|11>)
2. 0.5 (|01>+|00>+|10>+|11>)
3. 0.5 (|00>-i|01>+|10>+i|11>)
4. 0.5 (|00>+i |01>+i|10>+|11>).

3. Определение степени запутанности ненормированного состояния

1). |00>- i|11>, 2). |00>-|01>-|10>+|11>, 3). |00>+|01>+|10>-|11>.

ШКАЛА И КРИТЕРИИ ОЦЕНИВАНИЯ результатов обучения (РО) по дисциплине				
Оценка / виды оценочных средств	2 (не зачтено)	3 (зачтено)	4 (зачтено)	5 (зачтено)
Знания *(виды оценочных средств: опрос, тесты)*	Отсутствие знаний	Фрагментарные знания	Общие, но не структурированные знания	Сформированные систематические знания
Умения *(виды оценочных средств: практические задания)*	Отсутствие умений	В целом успешное, но не систематическое умение	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение (допускает неточности непринципиального характера)	Успешное и систематическое умение
Навыки (владения, опыт деятельности) *(виды оценочных средств: выполнение и защита курсовой работы, отчет по практике, отчет по НИР и т.п.)*	Отсутствие навыков (владений, опыта)	Наличие отдельных навыков (наличие фрагментарного опыта)	В целом, сформированные навыки (владения), но используемые не в активной форме	Сформированные навыки (владения), применяемые при решении задач

7. Ресурсное обеспечение:

7.1. Перечень основной и дополнительной литературы

Основная литература

1) Р.Фейнман, Д.Лейтон, П.Сэндз, «Квантовая механика», М.Наука, 2006.
2) В.М.Акулин, «Динамика сложных квантовых систем», М.Наука, Физ-мат. Лит., 496 стр., 2009.
3) Дж. Прескилл, «Квантовые вычисления и квантовые коммуникации» (1,2,3 тома), М.:Бином, 2009. Электронный вариант: Jh. Preskill, Quantum computations and communications, Lecture Notes in Computer Science, 2001.
4) Д.А.Кронберг, Ю.И.Ожигов, А.Ю.Чернявский, «Квантовая информатика и квантовый компьютер», изд.-во Макс-Пресс, МГУ, М. 2011.
5) Х-П.Бройер, Ф.Петруччионе, «Теория открытых квантовых систем», РХД, Москва-Ижевск, 2010.

Дополнительная литература

1) Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц, «Квантовая механика. Нерелятивистская теория», М.Наука, Физ-мат. Лит. 1971.
2) Д.А.Кронберг, Ю.И.Ожигов, А.Ю.Чернявский, «Алгебраический аппарат квантовой информатики», изд.-во Макс-Пресс, МГУ, М. 2011.
3) Ю.И.Ожигов, «Квантовые вычисления», изд.-во Макс-Пресс, МГУ, 2003.
4) К.Коэн-Таннуджи, Б.Диу, Ф.Лалоэ, «Квантовая механика.» тома 1,3. М., URSS, 2016. - 412 стр.

7.2. Перечень лицензионного программного обеспечения, в том числе отечественного производства

При реализации дисциплины может быть использовано следующее программное обеспечение:

1. Операционная система Ubuntu 18.04.
2. Программный продукт Dev-C++ Bloodshed Software
3. Программный продукт CodeBlocks The Code::Blocks Team
4. Программный продукт Free Pascal 3.0.0 Free Pascal Team
5. Программный продукт Python 3.5.1 (64-bit) Python Software Foundation
6. Операционная система Microsoft Windows 7 корпоративная академическая лицензия
7. Операционная система Microsoft Windows 10 Education академическая лицензия

7.3. Перечень профессиональных баз данных и информационных справочных систем

1. http://www.edu.ru – портал Министерства образования и науки РФ
2. http://www.ict.edu.ru – система федеральных образовательных порталов «ИКТ в образовании»
3. http://www.openet.ru - Российский портал открытого образования
4. http://www.mon.gov.ru - Министерство образования и науки Российской Федерации
5. http://www.fasi.gov.ru - Федеральное агентство по науке и инновациям

7.4. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»

1) http://www.arxiv.org, quant-ph
2) http://sci.cs.msu.ru/
3) http://sqi.cs.msu.su/learning/materials

7.5. Описание материально-технического обеспечения.

Филиал МГУ в г. Дубне, ответственный за реализацию данной Программы, располагает соответствующей материально-технической базой, включая современную вычислительную технику, объединенную в локальную вычислительную сеть, имеющую выход в Интернет. Используются специализированные компьютерные классы, оснащенные современным оборудованием.

Материальная база подразделения соответствует действующим санитарно-техническим нормам и обеспечивает проведение всех видов занятий (лабораторной, практической, дисциплинарной и междисциплинарной подготовки) и научно-исследовательской работы обучающихся, предусмотренных учебным планом.

8. Методические рекомендации по организации изучения дисциплины

8.1. Формы и методы преподавания дисциплины

(перечисляются в соответствии с таблицей 5.1.)

Используемые формы и методы обучения:
лекции
семинарские занятия
самостоятельная работа студентов.

В процессе преподавания дисциплины преподаватель использует как классические формы и методы обучения (лекции и семинарские занятия), так и активные методы обучения.

При проведении лекционных занятий преподаватель использует аудиовизуальные, компьютерные и мультимедийные средства обучения, а также демонстрационные и наглядно-иллюстрационные (в том числе раздаточные) материалы.

Семинарские занятия проводятся в форме проблемной ситуации, когда некоторый аспект рассмотренной темы излагается преподавателем более подробно. Часть информации конспектируется. Большая часть времени выделена на работу с использованием компьютерной техники и программного обеспечения.

В рамках курса используются активные и интерактивные методы обучения в процессе проведения занятий. Основными особенностями интерактивных занятий являются интерактивные практические упражнения и задания, которые выполняются обучающимися не только и не столько на закрепление изученного материала, но и на самостоятельное изучение нового.

8.2. Методические рекомендации преподавателю

Перед началом изучения дисциплины преподаватель должен ознакомить студентов с видами учебной и самостоятельной работы, перечнем литературы и интернет-ресурсов, формами текущей и промежуточной аттестации, с критериями оценки качества знаний для итоговой оценки по дисциплине.

При проведении лекций, преподаватель:

1) формулирует тему и цель занятия;

2) излагает основные теоретические положения;

3) с помощью мультимедийного оборудования и/или под запись дает определения основных понятий, расчетных формул;

4) проводит примеры из отечественного и зарубежного опыта, дает текущие статистические данные для наглядного и образного представления изучаемого материала;

5) в конце занятия дает вопросы для самостоятельного изучения.

Для семинарских занятий

Подготовка к проведению занятий проводится регулярно. Организация преподавателем семинарских занятий должна удовлетворять следующим требования: количество занятий должно соответствовать учебному плану программы, содержание планов должно соответствовать программе, план занятий должен содержать перечень рассматриваемых вопросов.

Во время семинарских занятий используются словесные методы обучения, как беседа и дискуссия, что позволяет вовлекать в учебный процесс всех слушателей и стимулирует творческий потенциал обучающихся.

При подготовке семинарскому занятию преподавателю необходимо знать план его проведения, продумать формулировки и содержание учебных вопросов, выносимых на обсуждение.

В начале занятия преподаватель должен раскрыть теоретическую и практическую значимость темы занятия, определить порядок его проведения, время на обсуждение каждого учебного вопроса. В ходе занятия следует дать возможность выступить всем желающим и предложить выступить тем слушателям, которые проявляют пассивность.

Целесообразно, в ходе обсуждения учебных вопросов, задавать выступающим и аудитории дополнительные и уточняющие вопросы с целью выяснения их позиций по существу обсуждаемых проблем, а также поощрять выступление с места в виде кратких дополнений. На занятиях проводится отработка практических умений под контролем преподавателя

8.3. Методические рекомендации студентам по организации самостоятельной работы.

Приступая к изучению новой учебной дисциплины, студенты должны ознакомиться с учебной программой, учебной, научной и методической литературой, имеющейся в библиотеке университета, встретиться с преподавателем, ведущим дисциплину, получить в библиотеке рекомендованные учебники и учебно-методические пособия, осуществить запись на соответствующий курс в среде электронного обучения университета.

Глубина усвоения дисциплины зависит от активной и систематической работы студента на лекциях и практических занятиях, а также в ходе самостоятельной работы, по изучению рекомендованной литературы.

На лекциях важно сосредоточить внимание на ее содержании. Это поможет лучше воспринимать учебный материал и уяснить взаимосвязь проблем по всей дисциплине. Основное содержание лекции целесообразнее записывать в тетради в виде ключевых фраз, понятий, тезисов, обобщений, схем, опорных выводов. Необходимо обращать внимание на термины, формулировки, раскрывающие содержание тех или иных явлений и процессов, научные выводы и практические рекомендации. Желательно оставлять в конспектах поля, на которых делать пометки из рекомендованной литературы, дополняющей материал прослушанной лекции, а также подчеркивающие особую важность тех или иных теоретических положений. С целью уяснения теоретических положений, разрешения спорных ситуаций необходимо задавать преподавателю уточняющие вопросы. Для закрепления содержания лекции в памяти, необходимо во время самостоятельной работы внимательно прочесть свой конспект и дополнить его записями из учебников и рекомендованной литературы. Конспектирование читаемых лекций и их последующая доработка способствует более глубокому усвоению знаний, и поэтому являются важной формой учебной деятельности студентов.

Методические указания для самостоятельной работы обучающихся

Прочное усвоение и долговременное закрепление учебного материала невозможно без продуманной самостоятельной работы. Такая работа требует от студента значительных усилий, творчества и высокой организованности. В ходе самостоятельной работы студенты выполняют следующие задачи: дорабатывают лекции, изучают рекомендованную литературу, готовятся к практическим занятиям, к коллоквиуму, контрольным работам по отдельным темам дисциплины. При этом эффективность учебной деятельности студента во многом зависит от того, как он распорядился выделенным для самостоятельной работы бюджетом времени.

Результатом самостоятельной работы является прочное усвоение материалов по предмету согласно программы дисциплины. В итоге этой работы формируются профессиональные умения и компетенции, развивается творческий подход к решению возникших в ходе учебной деятельности проблемных задач, появляется самостоятельности мышления.

Решение задач

При самостоятельном решении задач нужно обосновывать каждый этап решения, исходя из теоретических положений курса. Если студент видит несколько путей решения проблемы (задачи), то нужно сравнить их и выбрать самый рациональный. Полезно до начала вычислений составить краткий план решения проблемы (задачи).

Решение проблемных задач или примеров следует излагать подробно, вычисления располагать в строгом порядке, отделяя вспомогательные вычисления от основных. Решения при необходимости нужно сопровождать комментариями, схемами, чертежами и рисунками.

Следует помнить, что решение каждой учебной задачи должно доводиться до окончательного логического ответа, которого требует условие, и по возможности с выводом.

Полученный ответ следует проверить способами, вытекающими из существа данной задачи. Полезно также (если возможно) решать несколькими способами и сравнить полученные результаты.

Решение задач данного типа нужно продолжать до приобретения твердых навыков в их решении.

Задача — это цель, заданная в определенных условиях, решение задачи — процесс достижения поставленной цели, поиск необходимых для этого средств.

Алгоритм решения задач:

1. Внимательно прочитайте условие задания и уясните основной вопрос, представьте процессы и явления, описанные в условии.
2. Повторно прочтите условие для того, чтобы чётко представить основной вопрос, проблему, цель решения, заданные величины, опираясь на которые можно вести поиски решения.
3. Произведите краткую запись условия задания.
4. Если необходимо составьте таблицу, схему, рисунок или чертёж.
5. Определите метод решения задания, составьте план решения.
6. Запишите основные понятия, формулы, описывающие процессы, предложенные заданной системой.
7. Найдите решение в общем виде, выразив искомые величины через заданные.
9. Проверьте правильность решения задания.
10. Произведите оценку реальности полученного решения.
11. Запишите ответ.

9. Разработчик (разработчики) программы.

к.ф.-м.н. Хведелидзе А.