



Образовательные ресурсы и лучшая практика ИТ-образования

<https://doi.org/10.25559/SITITO.021.202502.328-337>

УДК 519.6; 378.4; 004.9

Роль квантовых программных симуляторов при формировании методологической базы для обучения квантовым вычислениям

О. В. Иванцова^{1,2}

Оригинальная статья

¹ Международная межправительственная организация
Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна,
Российская Федерация
Адрес: 141980, Российская Федерация, Московская область, г. Дубна,
ул. Жолио-Кюри, д. 6

² ГБОУ ВО Московской области «Университет «Дубна», г. Дубна,
Российская Федерация
Адрес: 141982, Российская Федерация, Московская область, г. Дубна,
ул. Университетская, д. 19

ivancova@jinr.ru

Аннотация

Статья посвящена актуальной проблеме разработки и внедрению механизма обучения квантовым вычислениям с использованием квантовых программных симуляторов в образовательную среду вуза. Серьезным барьером на пути развития квантовых вычислений является недостаточное количество квалифицированных специалистов, способных работать с новыми вычислительными технологиями. В статье рассматриваются подходы к формированию методологической базы для обучения этому научно-техническому направлению. Особое внимание уделяется использованию квантовых программных симуляторов, позволяющих проводить обучение с использованием классических вычислительных устройств. Приобретение практических навыков работы с квантовыми алгоритмами, включая их моделирование на программных симуляторах для запуска на классических устройствах является основной образовательной задачей при изучении подходов к квантовым вычислениям.

Предлагаемый автором подход интеграции квантовых вычислений в образовательную среду дает возможность формировать курсы обучения по квантовым вычислениям с фокусом на практическое применение в различных предметных областях. Доступность инструментария, интерактивность и гибкость (поддержка различных языков программирования и интеграция с другими инструментами и библиотеками) позволяют использовать предлагаемый механизм при разработке обучающих материалов различного уровня сложности и направленности, делая обучение доступным для более широкой аудитории.

Ключевые слова: квантовые вычисления, квантовые программные симуляторы, квантовые алгоритмы, образовательная среда

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Иванцова О. В. Роль квантовых программных симуляторов при формировании методологической базы для обучения квантовым вычислениям // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2025. Т. 21, № 2. С. 328-337. <https://doi.org/10.25559/SITITO.021.202502.328-337>

© Иванцова О. В., 2025



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.



Educational Resources and Best Practices of IT-Education

The Role of Quantum Software Simulators in the Formation of a Methodological Framework for Teaching Quantum Computing

O. V. Ivantsova^{a,b}

Original article

^a Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russian Federation

Address: 6 Joliot-Curie St., Dubna 141980, Moscow region, Russian Federation

^b Dubna State University, Dubna, Russian Federation

Address: 19 Universitetskaya St., Dubna 141980, Moscow Region, Russian Federation

ivantsova@jinr.ru

Abstract

The article is devoted to the urgent problem of developing and implementing a mechanism for teaching quantum computing using quantum software simulators in the educational environment of a university. A serious barrier to the development of quantum computing is the insufficient number of qualified specialists who are able to work with new computing technologies. The article discusses approaches to the formation of a methodological basis for teaching this scientific and technical direction. Special attention is paid to the use of quantum software simulators, which allow for training using classical computing devices. Acquiring practical skills in working with quantum algorithms, including their modeling on software simulators for running on classical devices, is the main educational task in studying approaches to quantum computing.

The approach proposed by the author to integrate quantum computing into the educational environment makes it possible to form training courses on quantum computing with a focus on practical application in various subject areas. The availability of tools, interactivity and flexibility (support for various programming languages and integration with other tools and libraries) allow using the proposed mechanism in the development of training materials of various levels of complexity and orientation, making learning accessible to a wider audience.

Keywords: quantum computing, quantum software simulators, quantum algorithms, educational environment

Conflict of interests: The author declares no conflict of interests.

For citation: Ivantsova O.V. The Role of Quantum Software Simulators in the Formation of a Methodological Framework for Teaching Quantum Computing. *Modern Information Technologies and IT-Education*. 2025;21(2):328-337. <https://doi.org/10.25559/SITITO.021.202502.328-337>



Введение

Квантовые информационные технологии (КИТ) – это область науки и техники, использующая принципы квантовой механики для обработки, хранения и передачи информации. Она включает в себя такие направления, как квантовые вычисления (КВ), квантовая криптография и квантовая телепортация. На пути практического применения квантового компьютера все еще стоят несколько серьезных препятствий, включая трудности разработки алгоритмов, которые используют квантовые компьютеры для снижения сложности общих вычислительных задач, использование маломасштабных квантовых технологий, доступных в настоящее время и в ближайшем будущем, для специализированных вычислительных задач и масштабирование квантовых технологий без ухудшения высокой точности, необходимое для крупномасштабных квантовых вычислений.

КВ требуют новой парадигмы программирования и нового программного обеспечения, а значит и специалистов, обладающих необходимыми компетенциями. Для практического применения КВ необходимо выстроить эффективную систему подготовки специалистов этого профиля. Разработка подходов и механизмов интеграции КВ в образовательную среду, позволяющих снизить барьеры для входа в область КВ и сделать обучение доступным для более широкой аудитории является одной из приоритетных задач в подготовке специалистов, обладающих необходимыми компетенциями.

Хотя КВ все еще находятся на начальной стадии развития, во многих странах мира на научные исследования и разработки в этой области уже выделяются значительные средства. В Российской Федерации с 2020 года поддержка развития КВ осуществляется в рамках Дорожной карты «Квантовые технологии» федерального проекта «Цифровые технологии» национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации»¹.

В 2019 г. Китай объявил о плане модернизации образования, предполагающем инвестиции в объеме 4% ВВП, и квантовые технологии – одно основных направлений образовательных программ. В 2023 году 367 000 человек в мире окончили вузы со степенями, связанными с КИТ; количество университетов с образовательными программами в этой области с 2022 года за год увеличилось на 8 процентов, до 195, в то время как количество университетов, предлагающих степени магистра увеличилось на 10 процентов до 55². Учреждения высшего образования должны сыграть главную роль в заполнении пробелов, необходимых для подготовки квалифицированных специалистов,

предоставляя базовые знания и передаваемые навыки посредством специализированных академических программ, проведения научных исследований, партнерства с промышленностью для практического обучения и предоставления возможностей обучения на основе опыта [1].

В РФ по данным ГК «Росатом» в 2022 г. число специалистов, окончивших бакалавриат, магистратуру и аспирантуру в области КИТ, составило соответственно 831, 226 и 63 человека. В 2024 году 30 Российских вузов имеют образовательные программы по КИТ.

Вузы при решении проблем кадрового дефицита сталкиваются с серьезными трудностями [2]. Отсутствие методологии обучения КВ имеет несколько эффективных причин. Основная заключается в том, что в РФ в настоящее время еще не приняты федеральные государственные образовательные и профессиональные стандарты по КВ. Также серьезными препятствиями являются отсутствие у большинства работодателей релевантного списка требований к таким специалистам и ограничение доступа к реальным квантовым компьютерам.

Совершенствование имеющихся и создание новых подходов для подготовки квалифицированных специалистов играют не менее важную роль в развитии КИТ, чем развитие программно-аппаратной и алгоритмической составляющих.

Основной целью данного исследования является анализ подходов и разработка механизма интеграции КВ в образовательную среду. В частности, исследование нацелено на:

- определение основных подходов к обучению КВ;
- анализ роли квантовых программных симуляторов (КПС) с использованием классических вычислительных архитектур в образовательном процессе;
- формирование механизма и методических рекомендаций по интеграции КВ в образовательную среду для разработки курсов обучения, ориентированных на практическое применение квантовых алгоритмов (КА).

Подходы к обучению квантовым вычислениям

Традиционно (с 1990-х годов) образовательные программы и курсы по КВ вузов в основном содержались в рамках физических факультетов и были ориентированы на студентов, обладающих фундаментальными знаниями тех разделов физики, которые лежат в основе физических моделей квантовых вычислений. Примерами могут служить образовательная программа «Фундаментальные проблемы физики квантовых технологий» в Московском физико-техническом институте (МФТИ)³ и магистерская программа «Квантовые вычисления» по направлению подготовки 03.04.02 «Физика» на

¹ Дорожная карта развития «сквозной» цифровой технологии «Квантовые технологии» [Электронный ресурс] // Минцифры, 2025. URL: <https://digital.gov.ru/uploaded/files/07102019kvantyi.pdf> (дата обращения: 01.04.2025).

² Steady progress in approaching the quantum advantage [Электронный ресурс] // McKinsey Digital. April 24, 2024. URL: <https://www.mckinsey.com/capabilities/mckinsey-digital/our-insights/steady-progress-in-approaching-the-quantum-advantage#/> (дата обращения: 01.04.2025).

³ Фундаментальные проблемы физики квантовых технологий [Электронный ресурс] // МФТИ, 2025. URL: <https://old.mipt.ru/education/chairs/fpft/about.php> (дата обращения: 01.04.2025).



физическом факультете МГУ имени М.В.Ломоносова»⁴. На сегодняшний день большинство ведущих университетов мира наряду с традиционными (физико-ориентированными) программами, активно разрабатывают и внедряют прикладные междисциплинарные программы и курсы по КВ⁵. Например, университет Ватерлоо (Онтарио, Канада) предлагает программы обучения магистров и аспирантов для предоставления знаний о КВ, включая теорию и практические занятия для магистров и аспирантов с углубленным изучением в различных областях исследований: по прикладной математике, химии, компьютерным наукам, вычислительной технике и другим⁶. Еще одним примером является университет Пердью (Индиана, США), предлагающий курсы трех уровней сложности по прикладным квантовым вычислениям, ориентированным на решение практических задач в различных областях⁷. Большинство доступных в настоящее время курсов имеют прикладной характер, часть из них в качестве аппаратной платформы для моделирования КА используют только квантовые устройства, но в большинстве курсов обучение построено на использовании как реальных квантовых устройств, так и классических компьютеров.

С 2023 года в некоторых российских вузах курсы по КВ включены в программы обучения для студентов нефизических специальностей: в Высшей школе экономики – для студентов специальности 10.05.01 «Компьютерная безопасность»⁸, в Казанском (Приволжском) федеральном университете – для студентов направления подготовки 01.03.01 «Математика»⁹. Прикладной междисциплинарный подход начинают поддерживать ведущие российские Вузы и при формировании образовательных программ: в центре квантовых технологий МГУ имени М.В.Ломоносова разработана междисциплинарная программа подготовки в рамках магистерской программы «Квантовые вычисления»¹⁰. В 2024 году

НИТУ МИСиС в партнерстве с ООО «СберОбразование» открыл магистерскую программу «Индустриальные квантовые технологии», поскольку внедрение квантовых технологий в реальные проекты требует появления новых специалистов, которые обладают не только теоретическими знаниями, но и могут применить их на практике¹¹. Образовательная платформа «Открытое образование», предлагает 10 онлайн-курсов по КВ: 8 курсов для направлений подготовки 03.03.02 «Физика», 03.03.01 «Прикладные математика и физика», 03.00.00 «Физика и астрономия», 1 курс для направления подготовки 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов» и 1 курс для направления подготовки 04.00.00 «Химия»¹².

Переход к прикладным подходам в обучении КВ обусловлен следующими основными факторами. Во-первых, развитие КПС устраняет зависимость от дорогих физических устройств, делая обучение доступным на классических компьютерах. Во-вторых, запрос индустрии сместился в сторону специалистов-практиков [3, 4], способных применять КА в конкретных областях (химия, финансы, материаловедение, биология и других). Технологическая доступность инструментария, возрастающий спрос на специалистов, имеющих компетенции в квантовых вычислениях и потребность в широком охвате аудитории обусловили сдвиг в сторону практико-ориентированных моделей обучения. Однако следует отметить, что прикладной междисциплинарный подход не отменяет традиционный, а дополняет его, отвечая на запросы индустрии в специалистах, владеющих навыками квантового программирования с использованием доступного в настоящее время программного обеспечения [5]. Более детальное сравнение традиционного и прикладного междисциплинарного подходов представлено в таблице 1.

Общий подход к разработке образовательных программ по КИТ в вузах, не имеющих соответствующего опыта, включает в себя развитие индивидуального опыта преподавателей, создание учебных модулей или целых курсов, стимулирование интереса среди преподавателей и руководителей, установление связей с отраслью и повышение заинтересованности студентов в данной области. Сначала следует разработать дополнительную междисциплинарную программу или сертификат, а затем уже отдельную образовательную программу. Развитие КВ и их применение в промышленных приложениях будут требовать подготовки все большего количества специалистов со знаниями и навыками этого вида вычислений [6]. При разработке образовательных программ, курсов или модулей следует акцентировать внимание на практическом обучении [7, 8]. Учитывая опыт ведущих российских и зарубежных вузов, а также

⁴ Магистерские программы физического факультета [Электронный ресурс] // МГУ имени М.В.Ломоносова, 2025. URL: <https://www.phys.msu.ru/abiturienty-magistratura.php> (дата обращения: 01.04.2025).

⁵ Cervantes B., Passante G., Wilcox B. R., Pollock S. J. An Overview of Quantum Information Science Courses at US Institutions [Электронный ресурс] // Physics Education Research Conference. August 4-5, 2021. P. 93-98. <https://doi.org/10.1119/perc.2021.pr.Cervantes>

⁶ Degrees in Quantum Information [Электронный ресурс] // University of Waterloo, 2025. URL: <https://publications.uwaterloo.ca/IQC-gradstudies-QuantumInfo/degrees-in-quantum-information.html> (дата обращения: 01.04.2025).

⁷ Quantum Computing I: Fundamentals [Электронный ресурс] // Purdue university, 2025. URL: <https://engineering.purdue.edu/online/courses/quantum-computing-i> (дата обращения: 01.04.2025).

⁸ Квантовые вычисления [Электронный ресурс] // НИУ ВШЭ, 2025. URL: <https://www.hse.ru/edu/courses/835161888> (дата обращения: 01.04.2025).

⁹ Программа дисциплины «Введение в квантовые вычисления» [Электронный ресурс] // КФУ, 2025. URL: <https://kpfu.ru/pdf/portal/oop/162971.pdf> (дата обращения: 01.04.2025).

¹⁰ Магистерская программа «Квантовые вычисления» [Электронный ресурс] // Центр квантовых технологий МГУ имени М.В.Ломоносова, 2025. URL: <https://quantum.msu.ru/ru/education/msc-programs/quantum-computing> (дата обращения: 01.04.2025).

¹¹ Образовательные программы. Индустриальные квантовые технологии [Электронный ресурс] // МИСиС, 2025. URL: <https://misis.ru/applicants/admission/magistracy/faculties/fizikamagifkn/quantech/> (дата обращения: 01.04.2025).

¹² Открытое образование [Электронный ресурс] // Openedu.ru, 2025. URL: <https://openedu.ru/catalog/?status=all&q=quantum> (дата обращения: 01.04.2025).



Таблица 1. Традиционный и прикладной междисциплинарный подходы к обучению квантовым вычислениям

Table 1. Traditional and applied interdisciplinary approaches to teaching quantum computing

Критерий	Традиционный подход	Прикладной междисциплинарный подход
Целевая аудитория	Студенты физических специальностей	Широкий спектр специальностей: компьютерные науки, математика, инженерия, химия, биология, экономика, финансы, материаловедение
Основная цель	Формирование глубокого понимания физических основ КВ, теорий квантовой информации, подготовка научных кадров для фундаментальных исследований	Формирование практических навыков разработки и применения КА для решения задач в конкретных предметных областях; подготовка инженеров-разработчиков программного обеспечения и специалистов по применению КВ
Направленность курса	Глубокое изучение теоретических основ и физических принципов КВ	Прикладное изучение КВ: практика квантового программирования, разработка, моделирование и симуляция КА для решения конкретных задач
Методы обучения	Лекции, семинары, решение теоретических задач, лабораторные работы на специальном оборудовании (при наличии доступа)	Краткие концептуальные лекции, проектная работа (кейсы), командные задания, интерактивные лабораторные работы на КПС, сотрудничество с индустрией
Основные инструменты	Специализированное ПО (квантовые компьютеры и квантовые симуляторы)	Квантовые программные симуляторы для классических архитектур, интерактивные среды разработки, облачные платформы и квантовые компьютеры (при наличии доступа).
Форматы обучения	Специализированные курсы в магистратуре/аспирантуре физических факультетов; полноценные магистерские программы	Короткие курсы/модули в рамках ИТ/инженерных/химических программ; сертификаты; онлайн-курсы; междисциплинарные магистерские программы
Преимущества	Глубокие фундаментальные знания; подготовка кадров для фундаментальных исследований и разработки квантового оборудования	Быстрая подготовка специалистов, обладающих навыками квантового программирования и применения КА; снижение барьеров входа; широкий охват аудитории; практическая направленность; гибкость, ориентация на запросы индустрии
Ограничения и трудности	Высокий барьер входа; изолированность от прикладных задач (часто); зависимость от дорогого оборудования	Трудно достичь баланса между практическими навыками и необходимыми знаниями фундаментальных физических принципов КВ; сложность разработки специализированного контента для разных предметных областей
Примеры реализации	МФТИ ³ , МГУ ⁴	ВШЭ ⁸ , НИТУ МИСиС ¹ , курсы на «Открытом Образовании» для нефизических специальностей ¹²

Источник: здесь и далее в статье все таблицы и рисунки составлены автором.

Source: Hereinafter in this article all tables and figures were made by the author.



собственный опыт преподавания курса «Квантовая программная инженерия», состоящего из нескольких модулей, включая базовый модуль «Квантовые вычисления», в Международной школе по информационным технологиям «Аналитика больших данных»¹³, наиболее целесообразным представляется прикладной междисциплинарный подход, направленный на решение конкретных задач в разных областях с помощью КВ. Обучение, основанное на предметно-ориентированных задачах, является эффективным способом повышения уровня профессиональной компетентности специалистов за счет приобретения практических знаний и навыков в области КВ.

Возможности использования квантовых программных симуляторов для вычислений на компьютерах классической архитектуры

Последние несколько лет ознаменовались существенным прогрессом в области квантовых технологий. Одним из важнейших достижений 2023 года стали разработки подходов для перехода от шумных квантовых компьютеров промежуточного масштаба (*Noisy intermediate-scale quantum, NISQ* [9]) к отказоустойчивым компьютерам [10]. Однако самая актуальная и наиболее сложная проблема, связанная с квантовыми вычислениями, остается пока нерешенной: создание квантового компьютера с достаточным количеством и качеством кубитов, обеспечивающего устойчивые к отказам вычисления. Хотя размер квантовых компьютеров (с точки зрения количества кубитов в них) и точность кубитов по отдельности неуклонно растут, совместного роста этих параметров пока достичь не удастся.

Пакеты средств разработки квантового программного обеспечения – квантовые SDK (*software development kit*) – являются важными инструментами, которые позволяют начать изучение КВ уже сегодня, задолго до того, как масштабируемые универсальные квантовые компьютеры станут реальностью. Они содержат библиотеки, программные симуляторы и другие инструменты для создания квантовых приложений и позволяют разработчикам составлять и тестировать квантовые алгоритмы с помощью различных языков программирования.

КПС эмулируют поведение квантовых устройств на классических процессорах, используя математические алгоритмы для имитации таких квантовых операций, таких как суперпозиция, запутывание и квантовая интерференция и являются основным инструментом для обучения квантовым вычислениям, но при этом имеют и ряд ограничений. Эффективность симуляторов зависит от мощности классических компьютеров, что ограничивает количество доступных кубитов (обычно до 40-50), скорость обработки и время выполнения алгоритмов. КПС могут не учитывать все аспекты

реальных квантовых систем (включая шум и ошибки), некоторые КА могут быть трудно реализуемыми на симуляторах. Для эффективного использования КПС требуется определенный уровень знаний в области квантовой механики и программирования, что может вызывать трудности на начальном этапе освоения.

Несмотря на указанные ограничения КПС являются в настоящее время важнейшими инструментами разработки квантовых алгоритмов и приложений для решения научных и инженерных задач. Они применяются для разработки и оптимизация прототипов КА перед их запуском на реальном квантовом устройстве.

Существует несколько десятков КПС [11], каждый из которых обладает своими преимуществами и недостатками [12]:

1. Qiskit [13, 14] является одним из наиболее глубоко разработанных квантовых SDK с интегрированным доступом к реальным квантовым устройствам IBM, с инструментами для разработки КА, хорошей документацией и обучающими материалами;
 2. Cirq [15, 16] представляет собой фреймворк Python, оптимизированный для работы с большими квантовыми системами, имеет интегрированный доступ к реальным квантовым процессорам Google;
 3. PennyLane [17] – активно развивающийся проект с фокусом на квантовом машинном обучении и квантовой химии;
 4. Strawberry Fields [18] имеет ограниченную область применения (предназначен только для моделирования квантовых оптических систем);
 5. cuQuantum (SDK NVIDIA) предоставляет гибкие и высоко-оптимизированные программные компоненты симуляторов квантовых схем для эффективной реализации КА на графических процессорах [19].
- Даже этот краткий список демонстрирует разнообразие ландшафта КПС. Предоставление библиотек Python в большинстве КПС значительно упрощает начало работы с ними для многих разработчиков. Основные квантовые SDK также интегрируются с традиционными языками, такими как C++, Java и .NET, такая совместимость позволяет создавать гибридные квантово-классические приложения [20].

Выбор КПС зависит от конкретных целей обучения, направления исследований и доступности программного обеспечения. Например, для моделирования оптических систем наиболее предпочтительным является Strawberry Fields, для разработки алгоритмов машинного обучения – PennyLane, для изучения основ КВ – Cirq/Qiskit/PennyLane (в зависимости от входного уровня знаний учащихся и основных задач курса), для моделирования КА на графических процессорах NVIDIA – cuQuantum.

Изучением, формализацией, разработкой КА и сценариев их практического применения занимаются во многих исследовательских учреждениях мира, в том числе в таких крупных международных научных организациях, как Европейская организация по ядерным исследованиям (ЦЕРН)^{14,15}, Объединенный институт

¹³ Международная школа по информационным технологиям «Аналитика больших данных» [Электронный ресурс]. URL: <https://itschool.uni-dubna.ru/> (дата обращения: 01.04.2025).

¹⁴ ЦЕРН (CERN, фр. Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire)



ядерных исследований (ОИЯИ), а также других научных центрах. В ОИЯИ в Лаборатории информационных технологий имени М. Г. Мещерякова (ЛИТ) на суперкомпьютере Говорун¹⁶ был имплементирован набор КПС, способных работать на различных вычислительных архитектурах (CPU и GPU). С их помощью был произведен анализ платформ для КВ, выявлены их особенности, достоинства и недостатки и обоснован выбор инструментария для моделирования КА, произведена оценка эффективности [21].

Механизм интеграции квантовых вычислений в образовательную среду

Интеграция квантовых вычислений в образовательную среду может быть достигнута сочетанием различных подходов [22-27]:

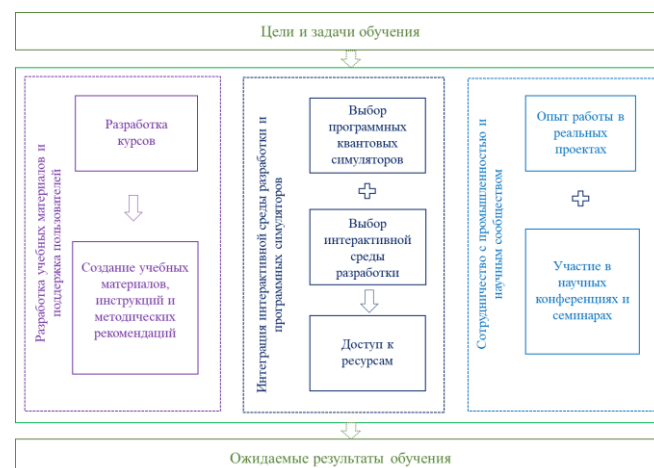
- создание курсов по квантовым вычислениям на уровне бакалавриата или магистратуры, включающих теоретические основы, практические задания и проектные работы;
- внедрение модулей по квантовым вычислениям в курсы по различным дисциплинам, например, по физике, химии, искусственному интеллекту, робототехнике и другим для решения междисциплинарных задач;
- разработка онлайн-курсов и платформ по квантовым вычислениям с видео-лекциями, заданиями и проектами;
- установление партнерства с компаниями, работающими в области квантовых технологий, для предоставления стажировок и работы в реальных проектах;
- проведение семинаров и мастер-классов с участием экспертов в области квантовых вычислений, где студенты могут задавать вопросы и обсуждать актуальные темы;
- участие студентов в конференциях и других научно-образовательных мероприятиях, посвященных квантовым вычислениям, что способствует обмену знаниями и идеями;
- командная работа студентов различных специальностей для междисциплинарных проектов.

Одним из вариантов реализации механизма интеграции КВ в образовательную среду в рамках прикладного междисциплинарного подхода является создание интерактивной веб-среды на основе вычислительных блокнотов, программного кода и данных, определяемых набором практических задач, для моделирования КА на КПС. Обобщенная схема предлагаемого механизма представлена на рис. 1.

В качестве платформы для предоставления учебных материалов, заданий и проектов предлагается использовать интерактивную веб-среду разработки для вычислительных блокнотов. При этом и учебные материалы должны быть представлены в виде

интерактивных материалов.

При разработке обучающих материалов необходимо ориентироваться на практическое использование интерактивной среды для моделирования и объяснения кода, исследование и визуализацию данных и работу программных симуляторов КВ, включая теоретические основы, практические задания и проектные работы. Формирование обучающих материалов по модульному принципу позволяет найти решения для обучения в области КИТ в различных формах (от встраиваемых модулей в различные существующие курсы до новых курсов обучения). Детализация и наполнение модулей зависят от целей курса, начального уровня подготовки учащихся, специфики предметной области, выбранных методов обучения и доступных инструментов обучения. При построении обучающих материалов предлагается имеющийся контент разделить на базовый и предметно-зависимый, ориентированный на развитие навыков решения задач с использованием программных квантовых симуляторов в различных областях: химии, физике, робототехнике, криптографии, финансах, энергетике, биологии, управлении и других.



Р и с. 1. Элементы механизма интеграции квантовых вычислений в образовательную среду

F i g. 1. Elements of the mechanism for integrating quantum computing into the educational environment

Для успешной интеграции необходимо выбрать те КПС, которые наиболее полно соответствуют учебным целям и требованиям курса, необходимо также обеспечить доступ обучающихся к вычислительным ресурсам (в том числе суперкомпьютерным).

На рис. 2 представлена структура обучающих материалов с базовым и предметно-зависимым контентом.

Поддержка учебного процесса должна включать методические материалы для преподавателей, включая рекомендации по оценке эффективности результатов обучения, а также разработку инструкций для пользователей.

Поддержка курса обучения в такой быстроразвивающейся области как квантовые вычисления требует постоянной актуализации обучающих материалов, и одним из факторов успеха в данном направлении является установление партнерских отношений с научными организациями и компаниями, работающими в области КВ, для

¹⁵ Quantum Technology Initiative [Электронный ресурс] // CERN, 2025. URL: <https://quantum.cern/> (дата обращения: 01.04.2025).

¹⁶ Суперкомпьютер «Говорун» [Электронный ресурс] // HybriLIT, 2025. URL: http://hlit.jinr.ru/supercomputer_govorun (дата обращения: 01.04.2025).



предоставления студентам возможности пройти практику и получить опыт работы в реальных проектах. Необходимо участие в конференциях и других научных мероприятиях, на которых студенты знакомятся с последними достижениями в области КИТ.



Р и с. 2. Модульная структура обучающих материалов с базовым и предметно-зависимым контентом

F i g. 2. Modular structure of educational materials with basic and domain-specific content

Гибкость предлагаемого механизма интеграции заключается в возможности выбора любой интегрированной среды разработки (большая часть которых являются кроссплатформенными), возможности выбора набора КПС, которые соответствуют учебным целям и требованиям курса, и модульной структуре обучающих материалов, ориентированных на формирование решений для обучения в области КВ в различных объемах (от отдельных модулей до полноценных специализированных обучающих курсов). Обучение квантовым вычислениям в рамках предложенного механизма обеспечивает следующие преимущества:

- способствует расширению компетенций специалистов различных специальностей, предоставляя возможность овладеть новыми знаниями и навыками в области квантовых вычислений, что может существенно расширить их профессиональные возможности в квантовых вычислениях, программировании, искусственном интеллекте;
- знания в области квантовых вычислений дают конкурентное преимущество на рынке труда и повышают привлекательность специалиста для работодателей, особенно в компаниях, активно развивающих квантовые технологии.

Понимание основных принципов данного вида вычислений и владение знаниями, умениями и навыками в КВ позволит разрабатывать и применять новаторские подходы к решению сложных задач и эффективно работать над технологическими инновациями. Современные технологии и инструменты, такие как интерактивная веб-среда разработки и КПС для моделирования на компьютерах классической архитектуры, открывают новые возможности для обучения и исследований.

Курс «Квантовая программная инженерия» в Международной школе по информационным технологиям «Аналитика больших данных» сфокусирован на получении практических знаний в области КВ, умении разрабатывать КА для решения задач в области интеллектуального управления и робототехники, включая разработку квантовых схем,

умении моделировать КА на КПС, а также формировании навыков командной работы в междисциплинарных проектах, связанных с квантовыми технологиями. В качестве интерактивной среды разработки для написания кода, визуализации результатов и создания документации были использованы возможности интерактивных методов обучения на основе Jupyter Notebook¹⁷. В качестве КПС были выбраны Qiskit, PennyLane и Cirq. Эффективность реализации данного курса в рамках предложенного механизма интеграции подтверждается результатами его двухлетней апробации (2022 – 2023 гг.). За этот период курс успешно прошли 38 студентов бакалавриата, представляющих специальности «Прикладная математика», «Программная инженерия», «Информатика и вычислительная техника», «Прикладная информатика», со средним баллом успеваемости 4.4. Студенты специальности «Прикладная математика» (10% от общего числа студентов) имели, в отличие от других, начальные теоретические знания в области КВ. Результаты анонимных опросов показали высокий уровень удовлетворенности студентов (4.7 по пятибалльной шкале, где 5 – полностью удовлетворен) практической направленностью курса. Большинство участников курса отмечали в отзывах полезность интерактивной среды Jupyter Notebook при работе с КПС для визуализации квантовых схем и пошаговой отладки алгоритмов. Сложность курса (после первой половины обучения) была оценена на 4.1 (по пятибалльной шкале, где 4 – сложно, а 5 – очень сложно), что связано в основном с невысоким уровнем остаточных знаний большинства студентов в таких областях, как линейная алгебра и теория вероятностей, отсутствием знаний квантовых концепций, лежащих в основе КВ и адаптацией к новому программному обеспечению. Сложность курса после его окончания была оценена на 3.8. Подавляющее большинство респондентов (92%) отметили по окончании курса значительное улучшение навыков работы с квантовыми программными симуляторами и понимания принципов проектирования и моделирования КА. Гибкость модульной структуры курса, позволившая адаптировать материал под разный уровень начальной подготовки, интерактивность Jupyter Notebook и доступность КПС являются основными факторами успеха данного курса. Основные трудности были связаны с необходимостью дополнительных консультаций по основам линейной алгебры и работе с КПС для части студентов. При доработке курса были добавлены справочные материалы по математическому аппарату и детализированы инструкции по работе с КПС. Опыт проведения курса подтвердил работоспособность и практическую эффективность предложенного механизма интеграции в формировании навыков квантового программирования на КПС, а также предоставил ценные данные для его улучшения.

¹⁷ Jupyter Notebook [Электронный ресурс] // Jupyter, 2025. URL: <https://jupyter.org/> (дата обращения: 01.04.2025).



Заключение

Интеграция квантовых вычислений в образовательную среду является основной задачей для поддержки развития квантовых информационных технологий в России, но она сталкивается с рядом вызовов, таких как сложность концепций и ограниченный доступ к реальным квантовым компьютерам, нехватка квалифицированных преподавателей. Однако эти трудности могут быть преодолены через активное развитие образовательных программ и курсов, повышение квалификации преподавателей, расширение доступа к квантовым технологиям, и начинать решать эти проблемы необходимо уже сейчас, чтобы подготовить новое поколение специалистов, способных реализовать потенциал квантовых вычислений и внести вклад в развитие этой технологии. На текущем этапе особенно интересным является направление, связанное с квантовыми программными симуляторами, использующими как CPU, так и GPU, что способствует развитию навыков разработки квантовых программ и моделирования КА.

Предложенный автором комплексный механизм, основанный на синергии прикладного междисциплинарного подхода к обучению квантовым вычислениям, модульной структуры контента (включающей базовый и предметно-зависимые модули), а также квантовых программных симуляторов для вычислений на классических компьютерах и

интерактивной веб-среды для разработки и моделирования КА, представляет собой доступный инструмент для формирования новых компетенций у специалистов в таких областях, как физика, химия, математика, инженерия, компьютерные науки, материаловедение и смежные направления. Сочетание методологической адаптивности, технологической осуществимости и ориентированности на получение практических навыков, а также доказанная результативность данного механизма позволяют рассматривать его как перспективную основу для формирования навыков квантового программирования на квантовых программных симуляторах у студентов различных специальностей.

Благодарности

Автор благодарит своих коллег профессора С.В. Ульянова за его вклад в организацию курса «Квантовая программная инженерия» и Н.В. Рябова за его вклад в проведение практических занятий в рамках этого курса.

Acknowledgements

The author thanks his colleagues, Professor S.V. Ulyanov for his contribution to organizing the course "Quantum Software Engineering" and N.V. Ryabov for his contribution to conducting the practical classes within this course.

References

1. Fox M.F.J., Zwickl B.M., Lewandowski H.J. Preparing for the quantum revolution: What is the role of higher education? *Physical Review Physics Education Research*. 2020;16(2):02013. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.16.020131>
2. Glukhov V.V., Byankin A.S., Burdakova G.I. Assessment of the role of universities in staffing the digital economy of the region. *π-Economy*. 2022;15(4):36-48. <https://doi.org/10.18721/JE.15403>
3. Temporão G.P., Guerreiro T.B.S., Ripper P.S.C., Pavani A.M.B. Teaching Quantum Computing without prerequisites: a case study. In: 2022 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE). Broomfield, CO, USA: IEEE Press; 2022. p. 673-676. <https://doi.org/10.1109/QCE53715.2022.00090>
4. Greinert F., Müller R., Bitzenbauer P., Ubben M.S., Weber K. Future quantum workforce: Competences, requirements, and forecasts. *Physical Review Physics Education Research*. 2023;16(2):010137. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.19.010137>
5. Satanassi S., Fantini P., Spada R., Levirini O. Quantum Computing for high school: an approach to interdisciplinary in STEM for teaching. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;1929:012053. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1929/1/012053>
6. Hughes C., et al. Assessing the needs of the quantum industry. *IEEE Transactions on Education*. 2022;65(4):592-601. <https://doi.org/10.1109/TE.2022.3153841>
7. Galetto F., et al. Experience in teaching quantum computing with hands-on programming labs. *The Journal of Supercomputing*. 2024;80(10):140290-14056. <https://doi.org/10.1007/s11227-024-06001-3>
8. Salehi Ö., Seskir Z., Tepe I. A computer science-oriented approach to introduce quantum computing to a new Audience. *IEEE Transactions on Education*. 2022;65(1):1-8. <https://doi.org/10.1109/TE.2021.3078552>
9. Preskill J. Quantum computing in the NISQ era and beyond. *Quantum*. 2018;2:79. <https://doi.org/10.22331/q-2018-08-06-79>
10. Cheng B., et al. Noisy intermediate-scale quantum computers. *Frontiers of Physics*. 2023;18(2):21308. <https://doi.org/10.1007/s11467-022-1249-z>
11. Fingerhuth M., Babej T., Wittek P. Open source software in quantum computing. *PLOS ONE*. 2018;13(12):e0208561. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0208561>
12. Paltenghi M., Pradel M. A Survey on Testing and Analysis of Quantum Software. *arXiv:2410.00650*. 2024. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.00650>
13. Aleksandrowicz G., et al. Qiskit: An Open-source Framework for Quantum Computing (0.7.2). *Zenodo*. 2019. <https://doi.org/10.5281/zenodo.2562111>



14. Alexander T., et al. Qiskit pulse: programming quantum computers through the cloud with pulses. *Quantum Science and Technology*. 2020;5(4):044006. <https://doi.org/10.1088/2058-9565/aba404>
15. Kharkov Y., et al. Arline Benchmarks: Automated Benchmarking Platform for Quantum Compilers. *arXiv:2202.14025*. 2022. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2202.14025>
16. Upama P.B., al. Evolution of Quantum Computing: A Systematic Survey on the Use of Quantum Computing Tools. In: 2022 IEEE 46th Annual Computers, Software, and Applications Conference (COMPSAC). Los Alamitos, CA, USA: IEEE Press; 2022. p. 520-529. <https://doi.org/10.1109/COMPSAC54236.2022.00096>
17. Bergholm V., et al. PennyLane: Automatic differentiation of hybrid quantum-classical computations. *arXiv:1811.04968*. 2018. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1811.04968>
18. Bromley T.R. et al. Applications of near-term photonic quantum computers: software and algorithms. *Quantum Science and Technology*. 2020;5(3):034010. <https://doi.org/10.1088/2058-9565/ab8504>
19. Bayraktar H., et al. CuQuantum SDK: A high-performance library for accelerating quantum science. In: 2023 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE). Bellevue, WA, USA: IEEE Press; 2023. p. 1050-1061. <https://doi.org/10.1109/QCE57702.2023.00119>
20. McClean J.R., Romero J., Babbush R., Aspuru-Guzik A. The theory of variational hybrid quantum-classic algorithms. *New Journal of Physics*. 2016;18(2):023023. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/18/2/023023>
21. Zrellov P.V., Ivantsova O.V., Korenkov V.V., Ryabov N.V., Ulyanov S.V. Evaluation of the capabilities of classical computers in the implementation of simulators of quantum algorithms. *Software products and systems*. 2022;35(4):618-630. (In Russ., abstract in Eng.) <http://doi.org/10.15827/0236-235X.140.618-630>
22. Mykhailova M., Svore K.M. Teaching Quantum Computing through a Practical Software-driven Approach: Experience Report. In: Proceedings of the 51st ACM Technical Symposium on Computer Science Education (SIGCSE '20). New York, NY, USA: Association for Computing Machinery; 2020. p. 1019-1025. <https://doi.org/10.1145/3328778.3366952>
23. Mykhailova M. Developing Programming Assignments for Teaching Quantum Computing and Quantum Programming. In: 2022 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE). Broomfield, CO, USA: IEEE Press; 2022. p. 688-692. <https://doi.org/10.1109/QCE53715.2022.00092>
24. How M. Advancing multidisciplinary STEM education with mathematics for future-ready quantum algorithmic literacy. *Mathematics*. 2022;10(7):1146. <https://doi.org/10.3390/math10071146>
25. Perry A., et al. Quantum Computing as a High School Module. *arXiv:1905.00282*. 2019. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1905.00282>
26. Kushimo T., Thacker B. Investigating students' strengths and difficulties in Quantum Computing. *arXiv:2212.03726*. 2022. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2212.03726>
27. Seegerer S., Michaeli T., Romeike R. Quantum Computing As a Topic in Computer Science Education. In: Proceedings of the 16th Workshop in Primary and Secondary Computing Education (WiPSCE '21). New York, NY, USA: Association for Computing Machinery; 2021. Article number: 13. p. 1-6. <https://doi.org/10.1145/3481312.3481348>

Поступила 01.04.2025; одобрена после рецензирования 17.05.2025; принята к публикации 10.06.2025.

Submitted 01.04.2025; approved after reviewing 17.05.2025; accepted for publication 10.06.2025.

Об авторе:

Иванцова Ольга Владимировна, научный сотрудник Лаборатории информационных технологий имени М.Г.Мещерякова, Международная межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований (141980, Российская Федерация, Московская область, г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, д. 6); преподаватель Института системного анализа и управления, ГБОУ ВО Московской области «Университет «Дубна» (141982, Российская Федерация, Московская область, г. Дубна, ул. Университетская, д. 19), **ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9575-7142>**, ivancova@jinr.ru

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

About the author:

Olga V. Ivantsova, Research Fellow of the Mescheryakov Laboratory of Information Technologies, Joint Institute for Nuclear Research (6 Joliot-Curie St., Dubna 141980, Moscow region, Russian Federation); Lecturer of the Institute of System Analysis and Management, Dubna State University (19 Universitetskaya St., Dubna 141980, Moscow Region, Russian Federation), **ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9575-7142>**, ivancova@jinr.ru

The author has read and approved the final manuscript.