



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-30-2-67-76>

*Оригинальная статья*  
*Original paper*

УДК 681.3.06

## МЕТОДЫ КВАНТОВОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ: ПОДХОДЫ К ФОРМИРОВАНИЮ ОНТОЛОГИИ И ФОРМАЛИЗАЦИИ СОВРЕМЕННОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ПАРАДИГМЫ В ОБРАЗОВАТЕЛЬНОМ ПРОЦЕССЕ

А. А. КРЮЧКОВ, М. А. КНЯЗЕВ

*МИРЭА – Российский технологический университет (г. Москва, Российская Федерация)*

*Поступила в редакцию 21.03.2024*

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2024  
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2024

**Аннотация.** В статье подтвержден возрастающий уровень вовлеченности международного сообщества в процесс развития квантовых технологий. В научном пространстве в отечественном сегменте авторами выявлено значительное отставание между уровнем и качеством существующих образовательных программ высших учебных заведений по отношению к международным достижениям практического характера в области разработки и программирования квантовых вычислительных устройств. В целях устранения сложившегося научно-методического разрыва рекомендуется внедрить в образовательные программы укрупненных групп направлений подготовки 09.00.00 и 10.00.00 соответствующие предметы в качестве отдельных дисциплин, либо в уже существующие [дисциплины], и расширить их до исследования возможностей методов квантового программирования. На основе собственного опыта преподавательской деятельности авторы предлагают возможную стратегию внесения соответствующих изменений, а также варианты корректировки рабочих программ дисциплин, включающих в себя задачи по программированию квантовых вычислительных устройств.

**Ключевые слова:** методы квантового программирования, технологии программирования, квантовые технологии, квантовые вычисления.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Благодарность.** Авторы выражают искреннюю благодарность наставнику и проводнику в мир квантовых технологий канд. техн. наук А. В. Королькову за критический подход и оперативную вовлеченность в процесс редактирования полученных результатов исследования.

**Для цитирования.** Крючков, А. А. Методы квантового программирования: подходы к формированию онтологии и формализации современной вычислительной парадигмы в образовательном процессе / А. А. Крючков, М. А. Князев // Цифровая трансформация. 2024. Т. 30, № 2. С. 67–76. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-30-2-67-76>.

## QUANTUM PROGRAMMING METHODS: APPROACHES TO THE FORMATION OF ONTOLOGY AND FORMALIZATION OF THE MODERN COMPUTING PARADIGM IN THE EDUCATIONAL PROCESS

ANDREY A. KRYUCHKOV, MAXIM A. KNYAZEV

*MIREA – Russian Technological University (Moscow, Russian Federation)*

*Submitted 21.03.2024*

**Abstract.** The article confirms the increasing level of involvement of the international community in the development of quantum technologies. In the scientific space in the domestic segment, the authors have identified a significant lag between the level and quality of existing educational programs of higher educational institutions

in relation to international practical achievements in the field of development and programming of quantum computing devices. In order to eliminate the existing scientific and methodological gap, it is recommended to introduce relevant subjects into the educational programs of enlarged groups of training areas 09.00.00 and 10.00.00 as separate disciplines, or into already existing [disciplines], and expand them to study the possibilities of quantum programming methods. Based on their own teaching experience, the authors propose a possible strategy for making appropriate changes, as well as options for adjusting the work programs of disciplines that include tasks for programming quantum computing devices.

**Keywords:** quantum programming methods, programming technologies, quantum technologies, quantum computing.

**Conflict of interests.** The authors declare no conflict of interests.

**Gratitude.** The authors express their sincere gratitude to the mentor and guide to the world of quantum technologies, Cand. of Sci. A. V. Korolkov, for the critical attitude and efficient involvement in the process of editing the obtained research results.

**For citation.** Kryuchkov A. A., Knyazev M. A. (2024) Quantum Programming Methods: Approaches to the Formation of Ontology and Formalization of the Modern Computing Paradigm in the Educational Process. *Digital Transformation*. 30 (2), 67–76. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-30-2-67-76> (in Russian).

## Введение

В настоящее время предметная область научно-практических исследований в сфере квантовых технологий и квантовых вычислений в частности с каждым годом привлекает все большее количество профильных специалистов как из числа представителей научного сообщества, так и среди сотрудников государственных структур и коммерческих объединений. В то время как государственные органы регулирования в условиях цифровизации экономики принимают активное участие в разработке и принятии нормативно-правовых документов и национальных программ по развитию предметной области, образовательные учреждения только приступают к внедрению профильных дисциплин по направлениям подготовки инженерных кадров по программе квантовых вычислений.

Представленные в статье результаты исследования могут быть полезными для профессорско-преподавательского состава учебных заведений, проводящих подготовку специалистов по направлениям, входящим в перечень укрупненных групп специальностей 09.00.00 «Информатика и вычислительная техника» и 10.00.00 «Информационная безопасность». Цель – систематизация накопленных знаний и формальное определение научно-практического образовательного направления «Методы квантового программирования».

## Государственные программы и национальные проекты как катализатор развития предметной области

Актуальность исследования подтверждается уровнем международных инвестиций, вкладываемых в квантовые технологии, а также количеством нормативных документов, принимаемых государственными инстанциями различных стран. С каждым годом наблюдается рост числа мировых держав, осознающих неизбежность прихода на международный рынок новых технологичных отраслей экономики и принимающих превентивные меры по регулированию, централизованному управлению и развитию соответствующих областей.

В 2018 г. Конгресс США опубликовал акт H.R.6227 Национальной квантовой инициативы с планом развития квантовых технологий в стране. Через четыре года были представлены закон H.R.7535 об обеспечении готовности государственных учреждений к возможным последствиям появления квантовых вычислительных устройств, представляющих потенциальную угрозу имеющимся системам обеспечения кибербезопасности, а также Меморандум NSM-10 о национальной безопасности и продвижении лидерства США в области квантовых вычислений.

Один из ключевых лидеров Азиатского региона Китайская Народная Республика в 2021 г. включила в 14-й Национальный экономический план развития исследования в области квантовых технологий как одно из передовых направлений, подлежащих приоритетному развитию на период вплоть до 2035 г. В марте 2023-го Великобритания опубликовала Национальную квантовую стратегию со сроком выполнения десять лет, направленную на превращение Объединенного Ко-

ролевства в научно-техническую сверхдержаву, с учетом последовательного развития и своевременного внедрения в практическую плоскость технологии квантовых вычислений.

В Российской Федерации в 2019 г. была утверждена дорожная карта развития «сквозной» цифровой технологии «Квантовые технологии», предполагающая развитие квантовых вычислений, квантовой криптографии и сенсорных технологий. Исполнение дорожной карты было установлено в пятилетний срок, однако в рамках актуализации полученных результатов в 2023 г. работа программы была дополнена новыми мероприятиями и продлена до 2030-го.

К числу стран, с недавнего времени уделяющих пристальное внимание квантовым технологиям на государственном уровне, присоединились Дания, Ирландия, Бразилия, Венгрия, Индия, Австралия, Канада, Южно-Африканская Республика и ряд других экономически развитых государств с устоявшимся научно-техническим потенциалом<sup>1</sup>. Одним из наиболее значительных событий, подтверждающих актуальность поставленной темы, является публикация в январе 2024 г. квантовой стратегии НАТО, цель которой – обеспечение «квантовой готовности» Североатлантического союза к внешним угрозам.

### **Механизмы системы образования в области подготовки специалистов в сфере квантовых технологий**

Выделяются три направления квантовых технологий:

- квантовые коммуникации;
- квантовые вычисления;
- квантовые сенсоры и метрология.

Квантовые коммуникации подразумевают под собой технологию криптографической защиты, использующей индивидуальные квантовые частицы для распределения общего секрета (ключа). Квантовые вычисления – класс вычислительных устройств, использующих для решения задач принципы квантовой механики. Квантовые сенсоры и метрология – совокупность высокоточных измерительных приборов, основанных на квантовых эффектах. Направление квантовых сенсоров и метрологии присутствует в исследовательских институтах и промышленных лабораториях с середины прошлого века. Данная область является фундаментом двух смежных дисциплин – квантовой криптографии и квантовых вычислений. По всему миру функционируют учреждения высшего образования, выполняющие подготовку кадров в области технологии материалов, нанотехнологий и прикладной физики. Механизм обучения и последующего включения молодых ученых в трудовую деятельность отлажен и стабильно удовлетворяет спрос на квалифицированных специалистов.

Идея квантовых коммуникаций впервые была опубликована в 1983 г. и сегодня имеет высокий уровень всесторонней проработки. За последние 40 лет область квантовой криптографии вышла на уровень промышленного производства коммерческих систем по обеспечению процесса выработки и распределения ключей. Как в зарубежных, так и в отечественных университетах имеются соответствующие программы подготовки студентов (например, 10.05.01), проводятся ежегодные форумы и конференции, внедряются дополнительные образовательные направления для юных инженеров совместно с курсами повышения квалификации для действующих профильных специалистов. Однако совершенно иначе дело обстоит с подготовкой ученых и разработчиков в сфере квантовых вычислений. Несмотря на актуальность вопроса, уровень внедрения тематических образовательных программ в вузах страны, а также работа по повышению информационной осведомленности среди технических специалистов и рядовых пользователей ИТ-инфраструктуры оставляет желать лучшего. Квантовые вычисления зачастую преподаются в одном из трех вариантов повествования: поверхностное освещение ключевых положений и возможностей квантовых компьютеров в научно-популярном стиле изложения; лекции по линейной алгебре, теории множеств и комплексный анализ как основа квантовых вычислений; прикладная физика и материаловедение с точки зрения вопроса создания квантовых процессоров.

Однозначно каждый озвученный подход важен, однако нередко ни один из указанных выше форматов обучения не подразумевает подготовку инженерных кадров в области программирования квантовых компьютеров, что подтверждается практически полным отсутствием тематичес-

<sup>1</sup> *Quantum Economy Blueprint*. Available: [https://www3.weforum.org/docs/WEF\\_Quantum\\_Economy\\_Blueprint\\_2024.pdf](https://www3.weforum.org/docs/WEF_Quantum_Economy_Blueprint_2024.pdf) (Accessed 10 February 2024).

кой технической литературы в русскоязычном сегменте, за исключением переводов иностранных книг и редких монографий, подготовленных самостоятельными усилиями молодых ученых. Таким образом, несмотря на синхронное развитие теории квантовых вычислений и квантовой криптографии (первые работы о квантовых компьютерах появились в 1980-х гг.), практическая область квантовых вычислений и смежные технологические подразделения естественной науки значительно отстают от сформулированной за последние десятилетия теории, что имеет разительное отличие в сравнении с аналогичным течением развития квантовых коммуникаций. Более того, в случае сопоставления Россия – мир становится очевидно, что локальные успехи соотечественников еще сильнее отстают от результатов иностранных научных объединений, что также отмечается в дорожной карте развития квантовых технологий в Российской Федерации.

В то же время в числе этапов и мероприятий по решению технологических задач дорожная карта предполагает реализацию новых образовательных программ в профильных университетах, организацию спецкурсов и центров дополнительного образования (рис. 1). Однако, если поиск специалистов и открытие базовых кафедр, занимающихся исключительно подготовкой инженеров в сфере квантовых технологий, являются трудозатратными, редкими и узкопрофильными инструментами решения поставленной задачи, то целенаправленная корректировка учебных планов и рабочих программ некоторых дисциплин способна решить вопрос с широким охватом большинства программ подготовок. А это предполагает выпуск большего числа студентов, владеющих навыками программирования квантовых компьютеров.

<p><b>Кадровые</b> (подробнее см. Табл 5)</p>	<p>Реализация новых образовательных программ, прежде всего, в профильных университетах, работа с талантливыми школьниками и кружковым движением</p> <p>Программы для возвращения из-за рубежа талантливых специалистов (пример, программа «1000 талантов» в Китае)</p>	<p>Реализованы образовательные программы, в тч международное сотрудничество</p> <p>Реализована программа по работе с диаспорой</p>	<p>2019–2024</p>	<p><b>Описание проекта</b></p> <p>Организация <b>профильных спецкурсов</b> в рамках программы школьного образования, <b>кафедр квантовых технологий на базе вузов</b> а также <b>центров дополнительного образования</b></p> <p>Формирование стандартов и верифицированных <b>методик</b> для образовательных курсов в школах, колледжах, ВУЗах</p>
---	--	--	------------------	---

Рис. 1. Этапы и мероприятия реализации дорожной карты  
(Источник <https://digital.gov.ru/ru/documents/6650/>)

Fig. 1. Stages and activities of the roadmap implementation (Source <https://digital.gov.ru/ru/documents/6650/>)

Существует острая необходимость во включении направления «Методы квантового программирования» в существующие программы обучения технических специалистов либо в формате самостоятельной дисциплины, либо в качестве отдельного глобального тематического блока в рамках одного из предметов – «Технологии и методы программирования» (ТМП) или «Методы программирования» (МП). Для этого нужно определить место квантового программирования по отношению к двум рассматриваемым предметам (рис. 2).



Рис. 2. Определение взаимосвязи предметов  
Fig. 2. Determining the relationship of subjects

### Рабочие программы дисциплин

В первую очередь следует определить соотношение предметов «Технологии и методы программирования» и «Методы программирования». Для этого необходимо дать определение каждому направлению подготовки студентов.

**Технологии программирования** – изучение производственных процессов, приводящих к созданию программного обеспечения [1].

**Методы** (от греч. *methodos* – путь исследования или познания) – совокупность относительно однородных приемов, операций практического или теоретического освоения действительности, подчиненных решению конкретной задачи [2].

Строгое определение термина «методы программирования» в научно-технической литературе отсутствует. За годы развития системы образования и в свете периодической смены образовательных стандартов сегодня дисциплина «Методы программирования» в подавляющем большинстве своих вариаций, за незначительными исключениями, охватывает изучение способов представления данных и элементы теории алгоритмов. После многочисленных дискуссий с учеными и практикующими программистами, а также с молчаливого согласия коллег авторы берут на себя ответственность и предлагают следующую формулировку.

**Методы программирования** – совокупность теоретико-практических способов представления данных в компьютерных программах, набор принципов построения и реализации алгоритмов работы со структурами данных с последующей оценкой сложности рассматриваемых алгоритмов.

Рассмотрим взаимосвязи между рабочими программами дисциплин (РПД) «Методы программирования» и «Технологии и методы программирования», представленные в табл. 1<sup>2</sup>. Авторы являются сотрудниками базовой кафедры РТУ МИРЭА, реализующей подготовку студентов по направлению 10.05.01 «Компьютерная безопасность», поэтому дисциплина «Методы программирования» хорошо им известна. Цели и задачи стороннего направления были уточнены у коллег других структурных подразделений вуза, а также взяты из рабочих программ, опубликованных за последние четыре года российскими университетами.

**Таблица 1.** Содержание рабочих программ дисциплин  
**Table 1.** The discipline's work programs

Содержание программы / Contents of program	Метод программирования / Programming method	Технология и метод программирования / Programming technology and method
Цель	Изучение основных алгоритмов работы с дискретными объектами, структурами данных и методами их исследования	Изучение порядков проектирования и эксплуатации ПО, получение навыков разработки алгоритмического ПО
Задачи	Изучение информационных структур, разработки алгоритмов, рекурсивных методов и алгоритмов	Изучение (+) методологии разработки ПО, оценки качества ПО, разработки приложений, тестирования ПО
Результат	Владеть технологиями структурного программирования при создании программ обработки сложных структур данных	Владеть навыками подбора алгоритмов и разработки программ для решения практических задач, навыками проектирования, разработки, отладки, тестирования, документирования ПО
Необходимо знать	Математическая логика и теория алгоритмов, дискретная математика, основы информатики, языки программирования	(+) основы проектирования ПО, операционные системы
Необходимо для следующего изучения	Компьютерная графика, компьютерное моделирование, базы данных, основы распределенных вычислений	(+) программно-аппаратные СЗИ, разрушающие программные воздействия, разработка веб-приложений, тестирование ПО
Краткий план программы	Принципы разработки ПО, ООП; структурное программирование; типы данных, структуры; алгоритмы сортировок, поиска; комбинаторные алгоритмы; задачи на графах; оценка сложности; ГСЧ; паттерны проектирования	Жизненный цикл, требования, спецификации, проектирование ПО; стандарты, этапы, методология, принципы разработки ПО; организация коллективов; методы отладки и тестирования ПО; структурное программирование; понятие алгоритма и модели вычислений
Техническое обеспечение	Вычислительные устройства с ОС, средства разработки компьютерных программ и приложений (MSVS, IDEA...)	
<p><i>Обозначения:</i> ПО – программное обеспечение; (+) – включение в РПД по ТМП перечислений из соответствующего пункта РПД МП; СЗИ – средства защиты информации; ООП – объектно-ориентированное программирование; ГСЧ – генератор случайных чисел; ОС – операционная система.</p>		

<sup>2</sup> Табл. 1 – усредненное обобщение ключевых положений РПД соответствующих дисциплин. (На бакалавриате и специалитете количество часов (следовательно, сама программа) может варьироваться от 4 до 7 зачетных единиц; в вузах, расположенных рядом с предприятиями конкретной отрасли, делается упор на программирование на требуемых высокоуровневых языках программирования, программа курса имеет направленность на подготовку специалистов в интересах потенциальных заказчиков, что жестко задается в РПД; и т. д.)

Таким образом, по сравнительному сопоставлению из табл. 1 следует закономерный вывод – дисциплина «Технологии и методы программирования» является более обширной научной областью, имеет всесторонний охват и полностью включает в себя направление «Методы программирования». Следующий шаг – определение места направления «Методы квантового программирования» в совокупности представленных программ подготовки инженерных кадров.

### Методы квантового программирования

Отталкиваясь от собственного опыта преподавательской деятельности в исследуемой области, авторы предлагают определение методов квантового программирования, как междисциплинарной совокупности физико-математических приемов построения квантовых вычислительных устройств, теоретико-практических способов реализации квантовых алгоритмов с последующей оценкой сложности рассматриваемых квантовых алгоритмов. Представленная формулировка служит наглядной демонстрацией отличия методов квантового программирования от методов классического программирования и является фундаментом построения и создания соответствующих образовательных программ системы высшего образования. Если говорить о «Методах квантового программирования» как о самостоятельной дисциплине, изолированной от других образовательных программ, то в первом приближении видится необходимость освещения двух фундаментальных блоков, представленных на рис. 3.



Рис. 3. Необходимый и достаточный набор знаний дисциплины «Методы квантового программирования»

Fig. 3. A necessary and sufficient set of knowledge of the discipline “Quantum programming methods”

В тематических блоках рис. 3 выделены области, пересекающиеся по сути содержания с изучаемыми разделами на предметах по классическим методам программирования. Это подразумевает зависимость дисциплин между собой, которая изображена на рис. 4.

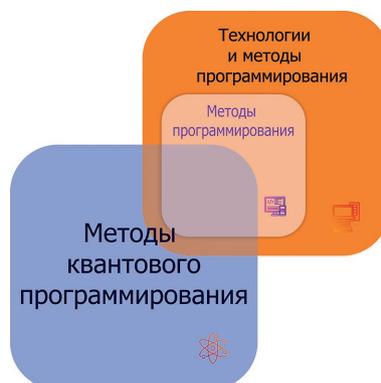


Рис. 4. Взаимосвязь предметов методов квантового и классического программирования  
Fig. 4. The relationship between the subjects of quantum and classical programming methods

Учитывая большое количество тематических пересечений, на первых этапах трансформации образовательных программ предлагается внедрение некоторых теоретико-практических знаний области квантового программирования в имеющиеся РПД двух рассматриваемых предметов с внесением корректировок, приведенных в табл. 2.

**Таблица 2.** Содержание рабочих программ дисциплин с учетом предлагаемых изменений  
**Table 2.** The discipline's work programs with the proposed changes

Содержание программы / Contents of program	Метод программирования / Programming method	Технология и метод программирования / Programming technology and method
Цель	Изучение основных алгоритмов работы с дискретными объектами, структурами данных и методами их исследования, зависимости, отличий и ситуаций применения классических и квантовых компьютеров. Получение навыков разработки алгоритмического ПО с учетом возможностей квантовых компьютеров	Изучение порядков проектирования и эксплуатации ПО, <u>принципов построения и методов применения квантовых вычислительных устройств.</u> Получение навыков программирования квантовых компьютеров, разработки алгоритмического ПО
Задачи	Изучение информационных структур, разработки алгоритмов, рекурсивных методов и алгоритмов, «квантовых» алгоритмов, хранения и обработки информации в квантовых компьютерах	Изучение (+) методологии разработки ПО, оценки качества ПО, разработки приложений, тестирования ПО, библиотеки и IDE квантового программирования
Результат	Владеть технологиями структурного программирования при создании программ обработки сложных структур данных на классических и квантовых вычислительных устройствах	Владеть навыками подбора алгоритмов и разработки программ для решения практических задач с помощью классических и квантовых вычислительных устройств, навыками проектирования, разработки, отладки, тестирования, документирования ПО
Необходимо знать	Математическая логика и теория алгоритмов, дискретная математика, основы информатики, языки программирования, теория функций комплексной переменной, алгебра, теория вероятностей и математическая статистика	(+) основы проектирования ПО, операционные системы, аппаратные средства вычислительной техники
Необходимо для последующего изучения	Компьютерная графика, компьютерное моделирование, базы данных, основы распределенных вычислений, криптография, криптографические методы защиты информации, машинное обучение	(+) программно-аппаратные СЗИ, разрушающие программные воздействия, разработка веб-приложений, тестирование ПО
Краткий план программы	Принципы разработки ПО, ООП; структурное программирование; типы данных, структуры; алгоритмы сортировок, поиска; комбинаторные алгоритмы; задачи на графах; оценка сложности; ГСЧ; паттерны проектирования	Жизненный цикл, требования, спецификации, проектирование ПО; стандарты, этапы, методология, принципы разработки ПО; организация коллективов; методы отладки и тестирования ПО; структурное и алгоритмическое программирование; понятие алгоритма и модели вычислений; внутреннее устройство квантовых компьютеров
	Введение в область квантовых вычислений; математический аппарат квантовых вычислений; анализ основ и ситуаций применения классических и квантовых компьютеров; средства разработки квантового ПО; методы квантового программирования; возможности и ограничения квантовых вычислений	
Техническое обеспечение	Вычислительные устройства с ОС; средства разработки компьютерных программ и приложений (MSVS, IDEA...) <u>Выход в интернет для доступа к облачным квантовым компьютерам и/или многокубитным квантовым симуляторам.</u> <u>Предустановленные квантовые малоразрядные симуляторы на стационарных компьютерах (Cirq, Qiskit...)</u>	

Обозначения – Те же, что в табл. 1.

Однако для более органичного и, с точки зрения студента, постепенного погружения в предметную область необходимо в полной мере задействовать междисциплинарность образовательных программ с незначительной корректировкой РПД смежных предметов (рис. 5). Непосредственный переход к изучению методов программирования квантовых компьютеров в наиболее благоприятном сценарии предполагает наличие у обучающихся серьезной предварительной подготовки по разноплановым техническим дисциплинам. Важно – во избежание дальнейших затруднений у студентов в понимании концепции квантовых компьютеров в целях недопущения заостренности восприятия нестандартной парадигмы вычислений есть смысл в проведении строгого разделения между классическими и квантовыми устройствами уже с ранних этапов обучения.

В рамках курсов по информатике, языкам программирования и операционным системам (рис. 5) возникают наиболее подходящие условия для освещения вопросов понимания квантовых вычислительных устройств, начиная с самых основ. К примеру – с анализа классической и вероятностной машины Тьюринга с точки зрения применимости данных условных абстракций к квантовым компьютерам.



Рис. 5. Место дисциплины «Методы квантового программирования» в образовательном процессе  
Fig. 5. The place of the discipline “Quantum programming methods” in the educational process

При изучении аппаратных средств вычислительной техники (АСВТ) будут уместными рассмотрение способов построения квантовых устройств, механизмов расположения физических кубитов на квантовом процессоре и анализ технологических подходов к созданию квантовых установок (на фотонах, ионные ловушки, сверхпроводники и др.). В обязательном порядке следует выполнить разбор критериев Ди Винченцо к требованиям по созданию квантовых компьютеров. Также в программе АСВТ, либо уже при изучении схемотехники, необходимо провести классификацию по формированию представления о том, к числу каких устройств можно относить квантовый компьютер – будь то цифровая, аналоговая техника, либо же аналоговый вычислитель.

В процессе четвертого семестра математического анализа («Теория функций комплексной переменной», ТФКП) и, возможно, в рамках базового курса физики необходимо и достаточно реализовать небольшое поверхностное освещение вопросов квантовых вычислений, чтобы у студентов изначально формировалось серьезное отношение к нередко «проходным» (по их мнению) предметам, а также уже на ранних стадиях зарождался интерес к исследуемой перспективной научно-практической области. Теория вероятностей и математическая статистика, а также алгебра, выступают одними из ключевых математических инструментов квантовых вычислений, вместе с ТФКП формируя фундамент моделирования, проверки и анализа получаемых результатов.

Непосредственно само программирование квантовых вычислительных устройств может проходить на практических и лабораторных занятиях по технологиям и методам программирования. Дальнейшее развитие полученных навыков находит свое применение в дисциплине (и схожих с ней) «Криптографические методы защиты информации». Это связано с тем, что некоторый набор алгоритмов квантового программирования предполагает непосредственное влияние на развитие данной области знаний, что будущие специалисты по защите информации в обязательном порядке должны брать во внимание. Весь объем полученных за продолжительный период обучения знаний будет закрепляться итоговой научно-исследовательской работой на старших курсах обучения.

### Стратегия постепенного внедрения направления подготовки «Методы квантового программирования» в образовательный процесс

Стратегия внедрения и последующего развития направления подготовки «Методы квантового программирования» в структуру программ 09.00.00 и 10.00.00 может быть успешно выполнена в три этапа.

Этап 1. Внедрение. Включение основных научных концепций и практических инструментов квантовых вычислений в существующие направления подготовки, как было продемонстрировано на примере корректировки с учетом заявленных целей и потребностей рабочих программ дисциплин МП и ТМП.

Этап 2. Закрепление. Создание цепной реакции междисциплинарности и поддержание актуальных сведений по квантовому программированию на всей дистанции обучения путем расширения научного знания предметной области с охватом смежных дисциплин. (Добавление те-

матического блока «Физика и техническое исполнение квантовых процессоров» в дисциплину «Аппаратные средства вычислительных технологий»; добавление теоретических положений о машине Тьюринга с учетом опыта квантовых компьютеров в курсы по информатике, языкам программирования и т. д.)

Этап 3. Развитие. Проведение прикладных НИР, грантов, исследовательских и практических работ студентами и сотрудниками кафедр; организация конференций и симпозиумов; мероприятия, направленные на развитие отрасли. Выделение квантового программирования в отдельную дисциплину, находящуюся в непосредственной взаимосвязи с другими образовательными программами (опционально).

### **Аргументация в пользу внедрения предлагаемого подхода**

Нередко звучал резонный вопрос, есть ли смысл и необходимость в введении предмета «Методы квантового программирования» в образовательную программу по двум укрупненным группам направлений подготовки. Наш ответ – да. По нескольким причинам.

Во-первых, международное сообщество в настоящий момент находится на переломном этапе научно-технического развития, когда происходит реформатирование экономических устоев и связей, направленных на стимулирование развития в предстоящие несколько десятилетий новых инновационных технологий, к числу которых относятся геновая инженерия, машинное обучение, квантовые коммуникации и вычисления. Нет определенности, через какой промежуток времени будет построен прикладной квантовый компьютер и появится ли он в принципе. Однако, имея в свободном доступе ряд технологий с неоспоримым потенциалом и предпосылками к дальнейшему становлению в качестве самостоятельной отрасли, не воспользоваться ими – весьма недуманный и стратегически неверный шаг, противоречащий этике научно-исследовательского подхода.

Во-вторых, внедрение в программу обучения квантового программирования не требует материально-технических вложений, что снимает значительную часть вопросов и облегчает процесс ассимиляции дисциплины. Единственные расходы, которые могут потребоваться, – это время, которое необходимо затратить профессорско-преподавательскому составу на погружение в предметную область.

Наконец, авторы являются сторонниками закона о переходе количества в качество. В связи с этим включение дисциплины «Методы квантового программирования» в образовательные программы видится вполне закономерным и последовательным шагом.

### **Результаты исследований и их обсуждение**

Рассмотрим опыт работы со студентами с направления подготовки 10.05.01 «Компьютерная безопасность» МИРЭА. В 2021 г. в рамках осеннего семестра 5-го курса в качестве тем для НИР обучающимся было предложено взять на выбор исследования, которые связаны с возможными вариациями программирования удаленных квантовых вычислительных устройств. В течение осеннего семестра для студентов проводились дополнительные практические занятия, чтобы внести некоторое понимание концептуальных отличий квантовых компьютеров от классических. По результатам семестра провели проверку и защиту выполненных работ совместно с производным срезом знаний путем выполнения проверочных заданий. Стало очевидно, что за один семестр и без предварительной подготовки материал студентами, за редкими исключениями, не усваивается, работы выполнялись поверхностно, без погружения в суть исследования, широты и подробного охвата знаний у студентов не наблюдалось.

Было решено изменить стратегию подхода к обучению по квантовым вычислениям. На третьем году обучения студенты проходят годовой курс дисциплины МП. После предварительных договоренностей определили, что два завершающих месяца весеннего семестра посвящаются рассмотрению базовых вопросов, связанных с программированием квантовых компьютеров. Студенты посещают лекции и далее закрепляют материал посредством выполнения несложных лабораторных работ. И именно над таким фундаментом в дальнейшем предполагается более эффективное проведение углубленных надстроек и улучшений их базы знаний для комплексного и всестороннего изучения предметной области – программирования квантовых вычислительных устройств.

Реализованный подход дал первые результаты весной 2024 г., когда началась организация процесса оформления договора на выполнение научно-исследовательской работы в интересах

коммерческого заказчика по тематике квантовых технологий. К работе были привлечены студенты, продемонстрировавшие наиболее успешные результаты в ходе освоения образовательных программ. Сегодня студенты обучаются квантовым вычислениям в связке двух предметов: «Методы программирования» (3-й курс) – «НИР» (5-й курс). В дальнейшем планируется более расширенный подход к обучению в соответствии с ранее предложенной стратегией.

### Заключение

1. Сделан очередной шаг на пути к созданию онтологии и формализации современной вычислительной парадигмы в образовательном процессе в контексте направления «Методы квантового программирования». Подтверждена актуальность необходимости внедрения новой дисциплины, что закономерно следует из непропорционального развития технологии по отношению к количеству образовательных программ и числу выпускающихся специалистов в области квантовых вычислений.

2. Проанализированы ключевые аспекты научно-практического направления, предложено формальное определение терминов «Методы программирования» и «Методы квантового программирования» для формирования представления о сути содержания и идеологического фундамента прикладных дисциплин.

3. Сформулированы цели и задачи направлений, рассмотрены варианты рабочих программ соответствующих дисциплин с учетом нормативных требований. Предложен план стратегии последовательной доработки программ профильных дисциплин технических направлений подготовки инженерных кадров в соответствии с потребностью в увеличении числа квалифицированных специалистов, отвечающих современным требованиям и тенденциям технологического развития.

4. Представленные результаты служат отправной точкой для дальнейшего закрепления фундаментальных положений рассматриваемой дисциплины в образовательном процессе укрупненных групп специальностей 09.00.00 и 10.00.00.

### Список литературы

1. Анашкина, Н. В. Технологии и методы программирования / Н. В. Анашкина, Н. Н. Петухова, В. Ю. Смольянинов. М.: Академия, 2012.
2. Коджаспирова, Г. М. Педагогический словарь / Г. М. Коджаспирова, А. Ю. Коджаспиров. М.: Академия, 2000.

### References

1. Anashkina N. V., Petukhova N. N., Smolyaninov V. Yu. (2012) *Technologies and Methods of Programming*. Moscow, Academy Publ. (in Russian).
2. Kodjaespirova G. M., Kodjaespirov A. Yu. (2000) *Pedagogical Dictionary*. Moscow, Academy Publ. (in Russian).

### Вклад авторов / Authors' contribution

Авторы внесли равный вклад в написание статьи / The authors contributed equally to the writing of the article.

#### Сведения об авторах

**Крючков А. А.**, ст. преп., МИРЭА – Российский технологический университет

**Князев М. А.**, асп., МИРЭА – Российский технологический университет

#### Адрес для корреспонденции

119454, Российская Федерация,  
г. Москва, просп. Вернадского, 78  
МИРЭА – Российский  
технологический университет  
Тел.: +7 499 215-65-65  
E-mail: kryuchkov\_a@mirea.ru  
Крючков Андрей Андреевич

#### Information about the authors

**Kryuchkov A. A.**, Senior Lecturer, MIREA – Russian Technological University

**Knyazev M. A.**, Postgraduate, MIREA – Russian Technological University

#### Address for correspondence

119454, Russian Federation,  
Moscow, Vernadsky Ave., 78  
MIREA – Russian  
Technological University  
Tel.: +7 499 215-65-65  
E-mail: kryuchkov\_a@mirea.ru  
Kryuchkov Andrey Andreevich