



Технические и социальные навыки, необходимые для квантовых вычислений

¹ Р. Хуарес-Рамирес, ORCID: 0000-0002-5825-2433 <reyesjua@uabc.edu.mx>

¹ С. Хименес, ORCID: 0000-0003-0938-7291 <samantha.jimenez@uabc.edu.mx>

¹ К. Х. Наварро, ORCID: 0000-0002-7220-7006 <cnavarro@uabc.edu.mx>

² С. Гуэрра-Гарсия, ORCID: 0000-0002-9290-6170 <cesar.guerra@uaslp.mx>

² Э. Г. Перес-Гонзалес, ORCID: 0000-0003-3331-2230 <hectorgerardo@uaslp.mx>

³ К. Фернандес-и-Фернандес, ORCID: 0000-0002-1586-8772 <caff@mixteco.utm.mx>

⁴ Х. Ортис-Эрнандес, ORCID: 0000-0002-6481-1537 <javier.oh@cenidet.tecnm.mx>

⁵ К. Кансино, ORCID: 0000-0002-7467-9082 <karina.cancino@uptapachula.edu.mx>

¹ Автономный университет Нижней-Калифорнии,
Нижняя Калифорния, Мексика.

² Автономный университет Сан Луис Потоси,
Сан Луис Потоси, Мексика.

³ Технологический университет Миштека,
Оахака, Мексика.

⁴ Национальный центр исследований и технологических разработок CENIDET,
Куэрнавака, Мексика.

⁵ Технологический университет Тапачула,
Тапачула, Мексика.

Аннотация. Квантовые вычисления, существенным образом основанные на квантовой механике, представляют значительные проблемы для людей, не имеющих достаточных знаний квантовой физики. Для работы в этой области необходимы значительные научные познания в квантовой теории, математике и смежных областях. Кроме того, междисциплинарный характер квантовых вычислений для эффективной командной работы требует наличия различных социальных навыков. В этой статье рассматривается и систематизируется научная литература, выявляя ключевые технические и социальные навыки, необходимые для подготовки студентов и специалистов в области квантовых вычислений, и помогая учебным заведениям разрабатывать соответствующие курсы и учебные планы.

Ключевые слова: квантовые вычисления; квантовая механика; математика; научные знания; профессиональные программистские навыки; учебное планирование.

Для цитирования: Хуарес-Рамирес Р., Хименес С., Наварро К. Х., Гуэрра-Гарсия С., Перес-Гонзалес Э. Г., Фернандес-и-Фернандес К., Ортис-Эрнандес Х., Кансино К. Технические и социальные навыки, необходимые для квантовых вычислений. Труды ИСП РАН, том 36, вып. 6, 2024 г., стр. 115–148. DOI: 10.15514/ISPRAS-2024-36(6)-7.

Благодарности. Авторы благодарят Математический исследовательский центр (CIMAT А.С.) за поддержку в предоставлении доступа к электронным базам данных. Кроме того, авторы благодарны Автономному университету Нижней Калифорнии за финансирование этого исследования в рамках проекта 3908_300/6/C/63/23 «Computación Cuántica: Implicaciones en la Ingeniería de Software y las Competencias del Ingeniero de Software», 23a Convocatoria Interna de Proyectos de Investigación acción. Наконец, авторы благодарят команду Мексиканского общества программной инженерии (REDMIS), которая участвовала в этом проекте и обзоре литературы.

Technical and Soft Skills Required for Quantum Computing

¹ R. Juárez-Ramírez, ORCID: 0000-0002-5825-2433 <reyesjua@uabc.edu.mx>

¹ S. Jiménez, ORCID: 0000-0003-0938-7291 <samantha.jimenez@uabc.edu.mx>

¹ C. X. Navarro, ORCID: 0000-0002-7220-7006 <cnavarro@uabc.edu.mx>

² C. Guerra-García, ORCID: 0000-0002-9290-6170 <cesar.guerra@uaslp.mx>

² H. G. Perez-Gonzalez, ORCID: 0000-0003-3331-2230 <hectorgerardo@uaslp.mx>

³ C. Fernández-y-Fernández, ORCID: 0000-0002-1586-8772 <caff@mixteco.utm.mx>

⁴ J. Ortiz-Hernández, ORCID: 0000-0002-6481-1537 <javier.oh@cenidet.tecnm.mx>

⁵ K. Cancino, ORCID: 0000-0002-7467-9082 <karina.cancino@uptapachula.edu.mx>

¹ Universidad Autónoma de Baja California,
Baja California, México.

² Universidad Autónoma de San Luis Potosí,
San Luis Potosí, México.

³ Universidad Tecnológica de la Mixteca,
Oaxaca, México.

⁴ Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico CENIDET,
Cuernavaca, México.

⁵ Universidad Tecnológica de Tapachula,
Tapachula, México.

Abstract. Quantum computing, strongly based on quantum mechanics, presents significant challenges for people without a background in quantum physics. Strong technical skills in quantum topics, mathematics, and related fields are essential for job roles in this area. Additionally, the multidisciplinary nature of quantum computing requires soft skills for effective teamwork. This paper reviews literature using systematic mapping to identify the key technical and soft skills needed to prepare students and professionals for the quantum computing field, helping educational institutions design appropriate courses and curricula.

Keywords: quantum computing; quantum mechanics; mathematics; technical skills; soft skills; curricula.

For citation: Juárez-Ramírez R., Jiménez S., Navarro C. X., Guerra-García C., Perez-Gonzalez H. G., Fernández-y-Fernández C., Ortiz-Hernández J., Cancino K. Technical and soft skills required for quantum computing. *Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS*, vol. 36, issue 6, 2024. pp. 115-148 (in Russian). DOI: 10.15514/ISPRAS-2024-36(6)-7.

Acknowledgements. We would like to thank Centro de Investigación en Matemáticas (CIMAT A.C.) for their support in providing access to electronic databases. Also, we would like to thank Universidad Autónoma de Baja California, for financing this research through the Project 3908_300/6/C/63/23 “Computación Cuántica: Implicaciones en la Ingeniería de Software y las Competencias del Ingeniero de Software”, 23a Convocatoria Interna de Proyectos de Investigación. Finally, thanks to the team Red Mexicana de Ingeniería de Software (REDMIS) who participated in this project and literature review.

1. Введение

Квантовые вычисления (QC) в настоящее время являются одним из самых многообещающих достижений, которые должны радикально изменить вычислительные машины и вычисления на них [1-9]. Построенные на принципах квантовой механики, таких как суперпозиция, запутанность и измерение, квантовые вычисления могут открыть перед нами совершенно новые перспективы. Квантовые вычисления неотделимы от квантовой механики [9-11]; их реализация требует и математического фундамента, и понимания вероятностного характера кубитов, и того, как можно ими управлять. Для тех, кто специализируются в области теории и практики вычислений на вычислительных машинах, а особенно для инженеров-программистов переход к использованию квантовых компьютеров представляет серьезные трудности.

Квантовая природа квантовых вычислений делает их недоступными для понимания специалистами, не работающими в области физики. Квантовые вычисления испытывают мощное влияние как квантовой механики, так и математики. Они включают в себя ключевые понятия из этих наук, в том числе следующие [5, 10, 12-13]:

- 1) квантовая механика – суперпозиция, запутанность, квантовая интерференция, измерение;
- 2) квантовые кубиты и квантовые состояния;
- 3) квантовые вентили и квантовые схемы;
- 4) линейная алгебра (векторные пространства, матрицы, собственные значения и собственные векторы);
- 5) комплексные числа;
- 6) теория вероятностей;
- 7) тензорное исчисление;
- 8) преобразования Фурье.

Математический базис квантовой механики, изучающей поведение элементарных частиц материи, был первоначально создан в начале XX века Нильсом Бором [14], Вернером Гейзенбергом [15], Эрвином Шредингером [16], Полем Дираком [17] и другими. В настоящее время в основе квантовых вычислений находятся именно эти фундаментальные принципы.

Вся необходимая совокупность знаний делает квантовые вычисления более сложными, чем классические. В результате программисты могут столкнуться с проблемами при попытке осмысливать и развивать квантовое программное обеспечение.

Многодисциплинарный подход к квантовым вычислениям. Смежными с квантовыми вычислениями областями являются квантовая информатика (QIS) и квантовые информационные технологии (QIST). Эти две научные области сильно взаимосвязаны, причем последняя делает основной упор на технологию разработки и управления. Сочетание в квантовой информатике элементов теории информации, информатики и квантовой механики способно привести к прорыву в области обработки информации [18].

Внедрением новых квантовых технологий в таких областях, как связь, сети, безопасность данных, навигация и медицинская диагностика [11, 19-20] с использованием достижений квантовой информатики заняты междисциплинарные коллективы. Квантовая информатика, сочетающая в себе квантовые принципы, формирует у разработчиков программного обеспечения новое мышление.

Текущий дефицит специалистов, прошедших обучение квантовым вычислениям. В последние годы квантовые вычисления становятся все более и более важными для всех наук, связанных с вычислительными машинами, и смежных с ними (например, с прикладной физикой [21] или вычислительной химией [22]). Развитию новых технологий и методов посвящено значительное количество ведущихся исследований [23]. Значительную трудность представляет высокая сложность квантовых вычислений, особенно в том смысле, который придают этому слову математика и физика, а это делает такие вычисления менее доступными для тех, кто работает в области теории и практики программирования [24].

Нехватка квалифицированных специалистов в области квантовых вычислений совершенно очевидна. В инфраструктурных скриптах и связующем коде в настоящее время встречается множество ошибок [25]. Для снижения их числа необходима более заметная языковая поддержка, для разработки квантового программного обеспечения и платформ, совершенно необходимы квалифицированные программисты. В настоящее время разработчиками квантовых программ становятся выпускники ВУЗов, не имеющие программистского образования, в частности, физики [25-26], которым не хватает серьезного классического образования в программной инженерии, в том числе навыков эффективного интеграционного тестирования.

Исследования показывают наличие пробелов в знаниях квантового программного обеспечения на предприятиях [27], что свидетельствует о необходимости изменений в методах программной инженерии и образовании [23].

Пути решения проблемы. Разработка квантовых программ – это динамично растущая отрасль, ориентированная на использование возможностей квантовых вычислений для различных приложений [3, 28-32]. В квантовых компьютерах используются кубиты, которые могут существовать в суперпозициях двух состояний, что по сравнению с классическими компьютерами позволяет быстрее и эффективнее выполнять сложные вычисления [30]. Однако разработка квантового программного обеспечения сталкивается с такими проблемами, как шум, необходимость исправления ошибок, масштабируемость и способность к взаимодействию [28-29, 32].

Для решения проблемы нехватки квалифицированных специалистов в отрасли поставщики квантовых технологий должны согласовать свои усилия с принципами квантовой программной инженерии, предлагая достаточный набор программных инструментов и обучающих курсов [3].

Чтобы добиться успеха в своей работе, создатели квантового программного обеспечения должны знать [33]:

- 1) все детали проблемы, которую они пытаются решить;
- 2) как написать квантовый код;
- 3) как записать решение своей проблемы в виде квантовой программы;
- 4) как писать масштабируемые квантовые решения (в зависимости от сценария использования).

Осознавая все эти требования отрасли, крайне важно определить знания и навыки, необходимые практикующим специалистам по квантовым вычислениям, особенно тем, кто специализируется в области квантовой программной инженерии. Таким образом, это исследование направлено на:

- 1) определение компетенций, необходимых в индустрии квантового программного обеспечения, с особым вниманием к знаниям и навыкам, существенным для специалистов в области квантовых вычислений.
- 2) определение ключевых концепций для разработки будущих учебных программ и образовательных мероприятий, способствующих привлечению учащихся к изучению научных основ квантовой информатики.

Важно отметить, что настоящая статья представляет собой несколько сокращенный вариант развернутой статьи “Skills required for Quantum Computing: A comprehensive review of recent Studies”, которая публикуется в этом году, и в которой можно найти более детальную информацию по затронутым вопросам [34].

Оставшаяся часть статьи организована следующим образом. Раздел 2 содержит описание текущей ситуации, включая описание потребностей предприятий-разработчиков в терминах компетенций, навыков и возможностей квантовых технологий. В разделе 3 описываются некоторые близкие работы, в которых представлены результаты подготовки студентов и проверки их компетенций в этой области знаний. В разделе 4 описывается методология, использованная при анализе литературных источников, суммируются шаги, выполнявшиеся для систематизации полученных данных. Раздел 5 представляет результаты выполненного обзора литературы, выделяя три основных элемента: фундаментальные знания для квантовых вычислений, необходимые технические (или профессиональные) навыки и необходимые социальные навыки. В разделе 6 приводится краткое обсуждение результатов обзора литературы и основных идей авторов. В разделе 7 содержатся выводы и будущая работа. В конце статьи представлены раздел ссылок и краткая информация о ее авторах.

2. Предыстория

Учебные заведения должны решать проблему нехватки квалифицированных специалистов в области квантовых вычислений, разрабатывая учебные программы, которые четко определяют компетенции и навыки, необходимые для будущих инженеров-разработчиков квантового программного обеспечения [3]. Эти новые учебные планы должны включать конкретные навыки, необходимые для разработки квантовых программ [35]. Кроме того, для эффективного решения этой проблемы и использования достижений квантовых вычислений необходимо наладить сотрудничество между промышленностью, академическими кругами и заинтересованными государственными структурами [1].

Для решения этой проблемы уже были предприняты определенные усилия. Далее описаны некоторые из них.

Потребности квантовой промышленности. В работе [36] приводится обзор 57 компаний, занятых в квантовой промышленности. Целью работы было определение номенклатуры рабочих мест, навыков и уровня подготовки для нанимаемых работников. Исследование проводилось в помощь образовательным учреждениям, которым было нужно адаптировать свои программы к требованиям отрасли на основе понимания конкретных рабочих ролей, навыков и уровней квалификации, необходимых в квантовом секторе.

Опрос выявил разнообразие возможностей по трудоустройству в квантовой индустрии, от узкоспециализированных ролей, таких как разработчики квантовых алгоритмов, до более широких позиций в бизнесе и программном обеспечении. Компании ищут и обладателей дипломов бакалавров, и кандидатов наук, но стараются нанимать защитивших магистерские и кандидатские диссертации. Выделены семь должностей, которые явно требуют навыков в квантовых вычислениях:

- 1) специалист по исправлению ошибок;
- 2) физик-экспериментатор;
- 3) физик-теоретик;
- 4) вычислительный химик;
- 5) инженер/научный сотрудник по фотонике/оптике;
- 6) разработчик квантовых алгоритмов;
- 7) архитектор приложений/решений.

Специальности и роли в экосистемах квантовых вычислений. Проанализировав 15 ведущих компаний, ведущих работы над глобальной экосистемой квантовых вычислений (global Quantum Computing Ecosystem), среди которых были компании IBM, Amazon, Microsoft, и Google, автор работы [8] определил, что в целом все изученные роли могут быть распределены по пяти непересекающимся кластерам специальностей:

- 1) программная инженерия,
- 2) аппаратная инженерия,
- 3) научные исследования,
- 4) технические консультации, и
- 5) управление продуктами и программами.

В качестве примеров должностей для Кластера 1 можно привести такие:

- инженер-разработчик квантовых программ;
- инженер-разработчик программ для встроенных систем;
- инженер-тестировщик и измеритель квантовых программ.

Работники, относящиеся к этому кластеру, выполняют, например, такие работы:

- развитие технологий квантовых вычислений для полного охвата стека архитектур;

- развитие приложений, чтобы сделать квантовый подход широко используемым и доступным.

Примеры навыков, необходимых для этой категории, включают такие языки, библиотеки, системы и технологии, как C, C++, Java, Python, Spring, MATLAB, HTML, Simulink, PostgreSQL, Julia, создание сценариев использования программного обеспечения для аппаратных интерфейсов.

Отчет, представленный в работе [8], показал, что более универсальные рабочие места в квантовой индустрии требуют сразу многих различных навыков, отнюдь не все из которых напрямую связаны с квантовыми вычислениями. Так как в должностных инструкциях могут отсутствовать точные детали требований, предъявляемых к работникам, для определения конкретных навыков, необходимых для квантовых должностей, предпринимаются и другие усилия, которые обсуждаются в следующем разделе.

3. Обзор аналогичных работ

Быть квантово-готовым означает обладать и теоретическими знаниями, и практическими навыками, нужными для работы с квантовыми технологиями [37]. Образовательные и научные учреждения могут помочь удовлетворить эту потребность, предлагая практикантам специализированные программы, проводя исследования и сотрудничая с промышленностью. Сложность квантовой механики делает квантовую информатику и квантовые технологии очень трудными для изучения и овладения. Исследования эффективности обучающих курсов QIST ограничены, а отсутствие стандартизированной учебной программы является серьезной проблемой из-за междисциплинарного характера области [38]. Растет признание необходимости учебных программ уже на уровне бакалавриата, как и потребности в учебных материалах по квантовой информатике и квантовой инженерии.

3.1 Усилия в области образования по специальностям квантовых вычислений

В работе [38] для более глубокого понимания поставленных проблем предлагается сочетать вводные лекции по квантовым вычислениям с практическими занятиями. Опрос, проведенный компанией IBM в 2020 году, предлагает включить в программу такие традиционные дисциплины, как линейная алгебра и квантовая механика, а также практические материалы, например, работу с языком Python, платформой Qiskit, а также практикум по калибровке оборудования с обучением студентов методам интеграции квантовых систем. Именно на интеграции реальных квантовых систем в учебную программу сделан упор в рекомендациях компании IBM. Некоторое представление о курсе, предложенном в работе [38], дается в табл. 1. Хотя в исследовании сообщалось о положительных результатах, оно представляет собой всего лишь одиночную инициативу, а не широко воспроизводимую модель.

В работе [13] ее авторы подчеркнули отсутствие устоявшихся традиций и исследований по обучению квантовой физике студентов, не имеющих физического образования. Они предлагают ввести в магистратуре курс, охватывающий восемь ключевых тем по квантовой физике и квантовой вычислительной технике:

- 1) волновые функции,
- 2) динамика функций движущихся волн;
- 3) квантование (не зависящее от времени уравнение Шредингера);
- 4) квантовая запутанность;
- 5) специфические квантовые алгоритмы;
- 6) универсальные вентили и их аппроксимации;

- 7) квантовые решения задач оптимизации;
- 8) квантовые вычисления в условиях средней зашумленности.

Табл. 1. Тематика лекционных курсов по квантовым вычислениям, поддержанных практическими занятиями.

Table 1. Quantum computation course topics with hands-on supplementary materials.

Традиционные лекционные курсы	Практические занятия
Модуль 1:	
Линейная алгебра	Язык программирования Phyton
Квантовая механика	Платформа Qiskit
Нотация Дирака	
Модуль 2:	
Квантовые алгоритмы	Квантовое программирование
Модуль 3:	
Аппаратура квантовых компьютеров	Калибровка квантового оборудования
	Устранение ошибок
	Преобразование программ

Групповые интервью и анкеты показывают, что студенты, изучающие информационные технологии, вполне способны к изучению квантовой физики и заинтересованы в ее изучении в рамках своего образования в области квантовых вычислений. Комплексный подход, сочетающий квантовую физику и информатику в одном курсе, в целом работает хорошо.

В работе [39] подчеркнуто, что квантовые информационные технологии (QIST) по своей сути междисциплинальны, они включают в себя такие области, как физика, информатика и инженерия. В своей работе авторы предложили три учебных плана по интеграции в программы бакалавриата по информатике тематик QIST. Эти планы были разработаны при участии промышленности, научных кругов и правительства. Каждый план включает в себя ряд тем, подходящих для семестровых курсов, но потенциально распространяемых на два семестра с дополнительными лабораторными занятиями. Темы охватывают фундаментальные принципы, кубиты, квантовые вентили, алгоритмы и практические аспекты, такие как квантовый интернет и устранение ошибок.

3.2 Усилия в области образования по специальностям квантовой программной инженерии

В некоторых исследованиях изучалось влияние квантовых вычислений на разработку программного обеспечения, анализировалось, как они влияют на каждую фазу жизненного цикла разработки программного обеспечения и прогресс в адаптации этих фаз к квантовым вычислениям.

Авторы работы [23] определили технические компетенции, необходимые студентам магистратуры по информатике для квантовых вычислений, сравнив их с текущими компетенциями выпускников бакалавриата. Их результаты подчеркивают разрыв между имеющимися и необходимыми компетенциями, предлагая, чтобы такие темы, как математика, физика и теория сложности, были включены в учебные планы по программной инженерии, как например, в стандарте SWEBOK [40], который определяет все этапы разработки программного обеспечения. На основе выполненного анализа компетенций авторы предлагают разработать концепцию обучения, чтобы лучше готовить студентов к работе по созданию квантового программного обеспечения.

В работе [41] авторы делятся своим опытом преподавания курса “Квантовые вычисления” для студентов технических факультетов, начиная со второго по пятый год обучения. Курс

предназначался для студентов, уже имевших знания в области дифференциального исчисления, линейной алгебры и программирования, но не изучавших квантовую механику и современную физику. Курс был направлен на развитие практических навыков квантового программирования, отталкиваясь не от описания базовых физических явлений, а от абстрактной логики квантовых вычислений. Курс использовал язык Q# и был основан на учебной программе, предоставленной квантовой сетью компании Майкрософт (Microsoft Quantum Network). Основными были признаны следующие темы:

- 1) введение в квантовые вычисления;
- 2) простые алгоритмы;
- 3) алгоритм квантового преобразования Фурье (QFT), блочные шифры Simon, оценка фазы и квантовый алгоритм факторизации Шора;
- 4) квантовый алгоритм решения задачи перебора (алгоритм Гровера);
- 5) реальность квантовых компьютеров.

3.3 Совершенствование деятельности по разработке программного обеспечения с помощью квантовых алгоритмов

В работе [42] мотивация была подчеркнута прогрессом квантовых компьютеров (КК), которые могут вскоре решить ранее казавшиеся неразрешимыми проблемы в таких областях, как химия, физика и финансы. Однако потенциал квантовых алгоритмов для ускорения задач программной инженерии (SE) остается неизученным. Авторы указанной работы провели исследование восьми групп квантовых алгоритмов, которые потенциально могут ускорить различные задачи программной инженерии на разных этапах, выявляя как новые возможности, так и возникающие проблемы:

- 1) решатели систем разреженных линейных уравнений;
- 2) алгоритмы для решения задач нахождения собственных значений и собственных векторов;
- 3) решатели систем дифференциальных уравнений [43-44];
- 4) методы подгонки моделей к данным и анализа точности подгонки;
- 5) квантовое машинное обучение (QML) [45-46];
- 6) комбинаторная (дискретная) оптимизация [47-49];
- 7) поиск и сравнение строк [50-53];
- 8) алгоритмы для проверки выполнимости формул пропозициональной логики в конъюнктивной нормальной форме.

3.4 Классификация работников, занятых квантовыми вычислениями

В работе [41] авторы исследуют классификацию работников, работающих в области квантовых вычислений, распределяя их по шести категориям, предложенным в подкасте [54] (см. табл. 2).

Эта классификация поддержана в работе [55], которая содержит сведения о проведенном опросе, в котором для различных учебных групп определены специфические образовательные подходы. В эти группы входили специалисты, повышающие свою квалификацию, интересующиеся всем новым старшеклассники, соискатели формальной магистерской степени магистра в этой области науки.

Классификация в табл. 2 помогает нам:

- 1) визуализировать различные уровни квалификации ведущих квантовые вычисления работников и соответственно ранжировать этих работников;

- 2) разработать курсы по квантовым вычислениям и программы практических занятий, адаптированные к этим уровням, потенциально интегрируя и другие навыки, такие как показанные в работе [56] и традиционной таксономии Блума [57-58].

Табл. 2. Классификация занятых в квантовых вычислениях.

Table 2. Classification of quantum workforce.

Категория	Описание
Квантовое любопытство (Quantum Curious)	Ищущие знаний об основах квантовых вычислений
Квантовое знакомство (Quantum Explorer)	Начавшие изучать некоторые концепции квантовых вычислений
Квантовый рост (Quantum Climber)	Решившие получить образование в области квантовых вычислений
Квантовое подключение (Quantum Enabled)	Знакомые с синтаксисом языков квантового программирования и с программными платформами
Квантовая готовность (Quantum Ready)	Понимающие и умеющие писать квантовые программы, а также разбирающиеся в сложных алгоритмах
Квантовый профессионализм (Quantum Professional)	Имеющие знания и навыки для выхода на рынок

4. Методология

При выполнении обзора литературы мы опирались на рекомендации авторов работ [59-61] по систематическому сопоставлению. Мы также рассмотрели рекомендации для систематических обзоров литературы, данные в работах [62-67], особенно важные для выработки критериев отбора. Иногда для большего охвата во внимание принимаются дополнительные источники [66], используется ручной и менее структурированный поиск в Интернете и других источниках [68] и малотиражная (“серая”) литература, как рекомендовано в [69]. В нашем исследовании мы использовали и формально опубликованные, и “серые” источники.

Далее в этом разделе мы описываем процесс систематического отбора источников для последующего анализа, выделяя основные элементы. Полная версия используемой методологии представлена в статье [34].

Формулировка исследуемых вопросов (Результат: рамки исследования). Решающее значение для вычислений имеют методы и средства программирования [30], при этом, благодаря способности квантовых вычислений решать сложные задачи в различных областях, набирает популярность квантовое программирование [32, 70-72]. Квантовое программирование важно уже потому, что именно оно позволяет использовать все возможности квантовых систем, позволяя решать ранее неразрешимые задачи [31, 73]. Важно и то, что для создания квантового программного обеспечения требуются дополнительные знания и навыки.

Цель обзора литературы: Цель состоит в том, чтобы определить навыки, необходимые в квантовой индустрии, особенно для реализации квантовых вычислений и разработки квантового программного обеспечения. Это включает в себя определение необходимых квантовых знаний и признание как технических (жестких), так и мягких навыков.

Важно отметить, что в предыдущем исследовании [74] представлено первое предложение фундаментальных концепций, связанных с квантовыми вычислениями. В настоящем исследовании набор фундаментальных концепций расширен.

Цель обзора литературы: Цель состоит в том, чтобы определить навыки, необходимые в квантовой индустрии, особенно при проведении квантовых вычислений и разработке квантового программного обеспечения. Поиск направлен и на выявление необходимых

квантовых знаний и признание как технических (жестких, hard), так и социальных (мягких, soft) навыков.

Важно отметить, что однажды уже проводилось исследование [74], в котором было получено первичное представление о фундаментальных концепциях, лежащих в основе квантовых вычислений. В настоящем исследовании этот набор фундаментальных концепций расширен.

Вопросы исследования: Были поставлены три основных вопроса:

RQ1: *Какими знаниями должны обладать сотрудники, выполняющие квантовые вычисления?*

RQ2: *Какими техническими навыками должны обладать сотрудники, выполняющие квантовые вычисления?*

RQ3: *Какими социальными навыками должны обладать сотрудники, выполняющие квантовые вычисления?*

Поиск фраз: Для поиска использовалась следующая фраза:

("quantum computing")
AND ("software engineer" OR "software developer" OR programmer)
AND (skills OR competences)

Рассматривавшиеся базы данных: Рассматривались четыре базы данных: ACM, IEEE Xplore, Scopus, и ScienceDirect.

Период: Рассматривались источники, опубликованные до июня 2023 года, когда проведение исследования было завершено.

Отбор данных для первичного анализа (Результат: отобраны все документы).

Выбор релевантных документов: Результат поиска показан в табл. 3. Из четырех баз данных по поисковой фразе отобраны более 400 элементов.

Табл. 3. Исследовавшиеся базы данных.

Table 3. Databases consulted.

База данных	Число обнаруженных статей (разделов)
ACM (AC)	232
ScienceDirect (SD)	105
Scopus	69
IEEE Xplore (XP)	32

Просмотр документов на предмет их включения в анализ или исключения из него (Результат: релевантные документы).

Отбор наиболее важных целей: Мы определили основу для идентификации полученных документов: демографические аспекты, критерии включения и исключения.

Демография: Определяется характер документа.

D1 – Тип документа: исследовательские работы и другие типы документов со значительным вкладом.

D2 – Происхождение документа: журналы, конференции и другие источники.

D3 – Язык: рассматриваются только работы, написанные на английском языке.

D4 – Доступность: полные тексты должны быть доступны через институциональные учетные записи.

Критерии включения: Мы установили двухуровневые критерии включения, имеющие вид фильтров.

Уровень 1: Заголовок документа.

F1: Название включает значимые ключевые слова или фразы, связанные с поисковой фразой.

F2: Раздел ключевых слов содержит важные слова или фрагменты поисковой фразы.

F3: Аннотация устанавливает четкую взаимосвязь между “квантовыми вычислениями”, “разработкой программного обеспечения” и “навыками”.

Уровень 2: Основной текст статьи.

B1: Результаты, которые вводят и описывают концепции квантовых вычислений и/или квантовых программ, а также необходимые навыки для их реализации.

B2: Результаты, в которых со ссылками на необходимые навыки обсуждаются квантовые вычисления и некоторые аспекты квантового программного обеспечения, или наоборот.

Критерии исключения: Критерии исключения применяются для удаления документов, не в которых не обнаруживается нужная информация, данные которых неполны или недоступны для исследования.

EX01: Удалить дубликаты, найденные в базах данных (крайне редкая ситуация).

EX02: Удалить документы, не являющиеся исследовательскими работами (если есть другие работы со значительным вкладом).

EX03: Удалить документы, представляющие собой не полные тексты, а рефераты.

EX04: Удалить документы, написанные не на английском языке (таких не найдено).

EX05: Документы, которые не вводят и не описывают концепции квантовых вычислений и/или квантовой программной инженерии.

EX06: Документы, в которых не обсуждается связь между вычислениями и/или квантовыми программами, инженером-программистом и навыками.

Результаты отбора: Были применены критерии исключения EX01, EX02, EX03 и EX04, а также фильтры уровня 1, полученные результаты отражены в табл. 4. В табл. 5 статьи помечены последовательно пронумерованными обозначениями как $S_1, S_2, \dots S_n$.

Табл. 4. Исследованные базы данных.

Table 4. Databases consulted.

База данных	Число обнаруженных статей (разделов)
ACM (AC)	37
ScienceDirect (SD)	6
Scopus	5
IEEE Xplore (XP)	3

Ключевые слова в аннотациях (результат: Схема классификации).

В соответствии с целью исследования для классификации отобранных работ были выделены три категории:

- 1) Требования к навыкам в области программирования (**категория 1**).
- 2) Образование/учебная программа – развитие навыков квантовых вычислений и практического программирования (**категория 2**).
- 3) Общие требования к навыкам квантовых вычислений (**категория 3**).

Категория 1: В эту категорию входят самые общие требования, предъявляемые к работникам компаний, выполняющим разработку программного обеспечения; сюда же относятся требования к программистам, работающим в этих компаниях.

Категория 2: В эту категорию входят требования по развитию навыков квантовых вычислений и разработке программного обеспечения, обеспечению связи между обеими областями.

Категория 3: К этой категории относятся требования к общим навыкам, необходимым для квантовых вычислений, особое внимание уделяется пониманию природы квантовых вычислений и конкретным навыкам, которых они требуют.

Табл. 5. Отобранные статьи после применения критериев включения и исключения.
Table 5. Selected papers after applying all the inclusion and exclusion criteria -systematic mapping.

ID_DB	ID_TR	REF.	Заголовок статьи
ACM:			
ACM-2	S ₁	[75]	Teaching Quantum Computing through a Practical Software-driven Approach: Experience Report
ACM-3	S ₂	[3]	Quantum Computing: A New Software Engineering Golden Age
ACM-4	S ₃	[33]	Towards Higher-Level Abstractions for Quantum Computing
ACM-5	S ₄	[35]	Quantum Software: Model-driven or Search-driven? A Q-SE 2021 Workshop Report
ACM-6	S ₅	[1]	Quantum computing: challenges and opportunities
ACM-7	S ₆	[25]	Bugs in Quantum computing platforms: an empirical study
ACM-8	S ₇	[26]	Making Quantum Computing Open: Lessons from Open-Source Projects
ACM-9	S ₈	[23]	Software Engineering Education of Classical Computing vs. Quantum Computing: A Competency-Centric Approach
ACM-10	S ₉	[76]	The business of quantum computing
ACM-12	S ₁₀	[77]	Quantum Computing as a Topic in Computer Science Education
ACM-15	S ₁₁	[78]	First International Workshop on Quantum Software Engineering (Q-SE 2020)
ACM-18	S ₁₂	[79]	Entanglion: A Board Game for Teaching the Principles of Quantum Computing
ACM-20	S ₁₃	[80]	QAI4ASE: Quantum artificial intelligence for automotive software engineering
ACM-21	S ₁₄	[81]	Hybrid quantum-classical problem solving in the NISQ era
ACM-22	S ₁₅	[82]	Thinking Too Classically: Research Topics in Human-Quantum Computer Interaction
ACM-23	S ₁₆	[83]	Building a quantum computer
ACM-25	S ₁₇	[84]	Exploring Quantum Reversibility with Young Learners
ACM-26	S ₁₈	[85]	The Holy Grail of Quantum Artificial Intelligence: Major Challenges in Accelerating the Machine Learning Pipeline
ACM-27	S ₁₉	[86]	Cyberinfrastructure Facilitation Skills Training via the Virtual Residency Program
ACM-31	S ₂₀	[87]	Reflections on cyberethics education for millennial software engineers
ACM-32	S ₂₁	[88]	Qupcakery: A Puzzle Game that Introduces Quantum Gates to Young Learners
ACM-39	S ₂₂	[89]	65 competencies: which ones should your data analytics experts have?
ACM-40	S ₂₃	[90]	Interactive online tool as an instrument for learning mathematics through programming techniques, aimed at high school students
ACM-41	S ₂₄	[91]	Evolution of the Competencies to Embrace Digital Technology for Sustainable Development
ACM-46	S ₂₅	[92]	A golden age for computing frontiers, a dark age for computing education?
ACM-47	S ₂₆	[93]	Beyond the badge: reproducibility engineering as a lifetime skill
ACM-48	S ₂₇	[94]	To Write Code: The Cultural Fabrication of Programming Notation and Practice
ACM-49	S ₂₈	[95]	Should Quantum Processor Design be Considered a Topic in Computer Architecture Education?
IEE Xplore:			
XP-07_	S ₃₈	[96]	Statistical Assertions for Validating Patterns and Finding Bugs in Quantum Programs
XP-12	S ₃₉	[97]	A Software Development Kit and Translation Layer for Executing Intel 8080 Assembler on a Quantum Computer
XP-13	S ₄₀	[98]	Need and Challenges in Quantum Computing in Fog Environment
Scopus:			
SC-7	S ₄₁	[99]	Quantum Programming on Azure Quantum—An Open Source Tool for Quantum Developers
SC-21	S ₄₂	[100]	Society 5.0 and the future of work skills for software engineers and developers
SC-24	S ₄₃	[101]	Industry quantum computing applications
SC-52	S ₄₄	[102]	New Programming Paradigms.
SC-57	S ₄₅	[103]	Introducing Microsoft Quantum Computing for Developers: Using the Quantum Development Kit and Q#
ScienceDirect:			
SD-4	S ₄₆	[104]	Reigniting the power of artificial intelligence in education sector for the educators and students' competence.
SD-6	S ₄₇	[105]	QuantuMoonLight: A low-code platform to experiment with quantum machine learning
SD-20	S ₄₈	[106]	Industry 4.0 in Terms of Industrial Relations and Its Impacts on Labour Life
SD-26	S ₄₉	[107]	The future of sustainable digital infrastructures: A landscape of solutions, adoption factors, impediments, open problems, and scenarios
SD-33	S ₅₀	[108]	Industry 4.0 in a project context: Introducing 3D printing in construction projects
SD-55	S ₅₁	[109]	Fresh Outlook on Numerical Methods for Geodynamics. Part 2: Big Data, HPC, Education

Извлечение данных и их отнесение к той или иной категории (результат: Систематизация результатов).

В табл. 6 показан результат группирования документов по трем указанным категориям. Как легко видеть, наибольшее число статей попало в категорию 2, следом идет категория 3, а категория 1 по размерам близка к категории 3. Результаты показывают, что учебные заведения серьезно относятся к подготовке квалифицированных выпускников и стремятся соответствовать требованиям промышленности и вызовам, предъявляемым со стороны квантовых вычислений.

Табл. 6. Распределение работ по категориям.
Table 6. Grouping of papers into categories.

Категория	Источники
1. Требования к квалификации для работы в отрасли	S ₁₃ , S ₁₈ , S ₂₂ , S ₂₄ , S ₂₆ , S ₄₁ , S ₄₂ , S ₄₃ , S ₄₄ , S ₄₅ , S ₅₀
2. Образование/учебная программа (развитие навыков квантовых вычислений и программной инженерии)	S ₁ , S ₄ , S ₈ , S ₁₀ , S ₁₁ , S ₁₂ , S ₁₃ , S ₁₄ , S ₁₇ , S ₁₉ , S ₂₀ , S ₂₁ , S ₂₃ , S ₂₅ , S ₂₆ , S ₂₇ , S ₂₈ , S ₂₉ , S ₃₀ , S ₃₁ , S ₃₂ , S ₃₃ , S ₃₄ , S ₃₅ , S ₃₆ , S ₃₇ , S ₄₄ , S ₄₆ , S ₄₉ , S ₅₁
3. Общие требования к навыкам по квантовым вычислениям	S ₂ , S ₃ , S ₅ , S ₆ , S ₇ , S ₉ , S ₁₅ , S ₁₆ , S ₁₈ , S ₃₈ , S ₃₉ , S ₄₀ , S ₄₅ , S ₄₇

5. Результаты

Отвечая на поставленные исследовательские вопросы, подробно рассмотрим три основных компонента компетенции – знания, технические навыки, социальные навыки.

RQ1: Какими знаниями должны обладать сотрудники, выполняющие квантовые вычисления?

Чтобы ответить на этот вопрос, мы рассмотрели основные квантовые концепции, упоминаемые в изученных источниках из табл. 6. При этом, чтобы иметь полное понимание основных концепций, некоторые определения, представленные в этом разделе, были взяты из вспомогательной литературы. В качестве основы мы рассматриваем фундаментальные концепции квантовых вычислений, предложенные в работе [110].

Будем отталкиваться от таксономии, строящейся с учетом самых необходимых знаний. Это позволит нам получить более полную, всеобъемлющую базу знаний.

Квантовая теория информации (QIT). Эта дисциплина охватывает значительный набор знаний. Ее задача – исследование достижимых пределов обработки информации в рамках квантовой механики [111]. На рис. 1 показана связь этой науки с другими научными областями.

Квантовая информация – это информация о состоянии квантовой системы. Она является основным объектом исследования в квантовой теории информации [112], квантовую информацию можно обрабатывать с помощью методов квантовой теории информации.

Теория информации. Теория информации – это математический подход к оценке количества информации, к изучению методов хранения и передачи информации [113] (см. рис. 2).

К важным разделам теории информации относятся кодирование алфавитов символов, теория алгоритмической сложности, алгоритмическая теория информации и теоретико-информационная безопасность (см. рис. 3).

Квантовая механика. Квантовая механика – область физики, изучающая поведение элементарных частиц на микроскопическом уровне [114-115]. Основные понятия квантовой механики показаны на рис. 4.



Рис. 1. Квантовая информатика как междисциплинарная композиция.
Fig. 1. Quantum Information Science -interdisciplinary composition.

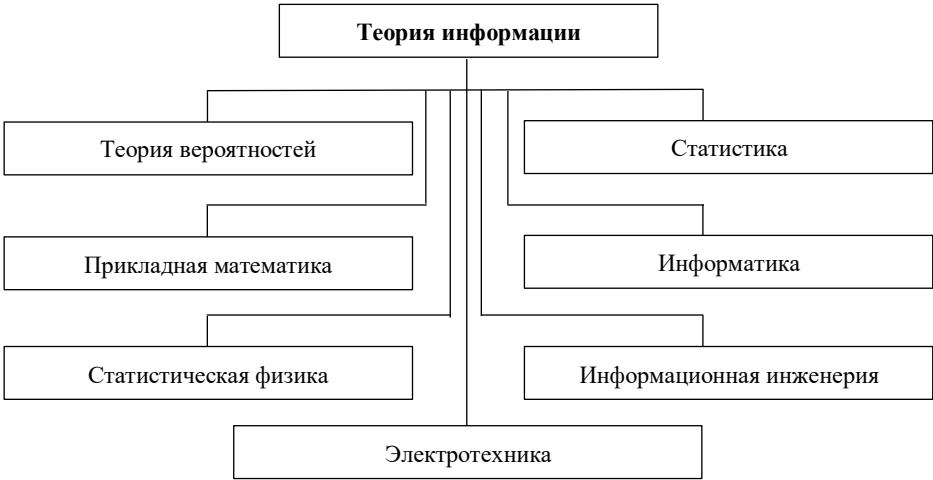


Рис. 2. Теория информации как пересечение научных дисциплин.
Fig. 2. Information Theory -interdisciplinary intersection.

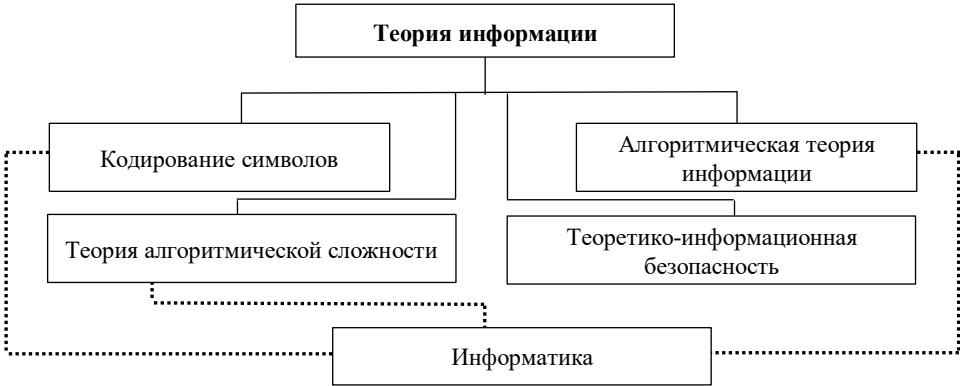


Рис. 3. Составные части теории информации.
Fig. 3. Information Theory -subfields.



Рис. 4. Базовые концепции квантовой механики.

Fig. 4. Quantum Mechanics – fundamental concepts.

Хорошо описанные определения основ квантовой механики, такие как суперпозиция, запутанность и декогерентность, а также кубит как фундаментальная единица вычисления, представлены в работах [115-117] и подробно объяснены в работе [118].

Основные понятия квантовой механики проиллюстрированы на рис. 5, где с помощью конкретных понятий обозначены некоторые основополагающие концепции.

Математика. Математика как наука связана с квантовыми вычислениями по двум направлениям – использованием вероятностного подхода при измерении квантовых состояний и применением методов линейной алгебры для матричного представления квантовых вентилей, являющихся физической основой выполнения квантовых вычислений. Математические концепции, используемые в квантовой механике, показаны на рис. 6.

Физика. Физика является фундаментальной наукой, которая, кроме прочего, включает в себя и квантовую механику [119-120], поэтому так важно изучать фундаментальные концепции этой науки. В работах [121-123] подчеркивается вклад физики в квантовые вычисления. На рис. 7 представлен список тем для рассмотрения.

Информатика. Наука информатика состоит в изучении методов вычислений, информации и автоматизации [124-126] (см. рис. 8). Квантовые вычисления своими важнейшими концепциями и принципами опираются на информатику [10]. Понятия, вводимые в информатике, которые могут иметь отношение к квантовым вычислениям, показаны на рис. 9.

RQ2: Какими техническими навыками должны обладать сотрудники, выполняющие квантовые вычисления?

Сложные навыки, называемые техническими, – это любые навыки, относящиеся к конкретной задаче или ситуации. Они включают в себя как понимание, так и владение специфической деятельностью, включающей методы, способы, процессы, процедуры [127]. Технические навыки тесно связаны со знаниями, основу знаний для технических навыков создает ответ на вопрос RQ1. Чтобы ответить вопрос RQ2, мы дополнительно рассмотрели наиболее распространенные технические навыки, указанные в авторитетных источниках перечисленных в табл. 6. При этом из вспомогательной литературы были извлечены даже более комплексные предложения. В работе [128] представлен список навыков, необходимых в квантовой индустрии, разделенный на группы по рекомендуемым курсам обучения. Авторы этой работы предложили формат интервью, которое помогает уточнить необходимые навыки. Списки научных и технических навыков, использованные в качестве подсказок в

протоколе собеседования, были взяты из отчета Объединенной целевой группы по программам бакалавриата по физике за 2016 год [123]. В этой вспомогательной работе особое внимание уделяется знаниям и научному опыту.



Рис. 5. Квантовая механика – детализированный взгляд.
Fig. 5. Quantum Mechanics -a detailed view.

Знания, специфичные для физики: Цели обучения физике включают в себя способность применять фундаментальные концепции, в частности, законы сохранения, для решения задач, компетентность в использовании базовых законов физики в различных областях и контекстах, а также умение представлять эти концепции несколькими способами при решении междисциплинарных проблем.

Научно-технические навыки: Цели обучения научно-техническим навыкам включают решение сложных задач с проведением экспериментов, моделирования и построением аналитических моделей; планирование дальнейших исследований и определение потребностей в ресурсах. Они также включают в себя умение работать с приборами, проектировать и писать программы, кодированием и проводить анализ данных.

За основу для распределения результатов по категориям нами был взят именно такой набор технических (жестких) навыков. Табл. 7 демонстрирует общий взгляд на четыре выделенные нами категории навыков. Описание навыков, необходимых для квантовых вычислений, по каждой категории в этой таблице дано практиками-специалистами, здесь же указана литература, описывающая эти навыки. Табл. 8 содержит набор навыков, необходимых для

выполнения реальных работ и связанных с теорией квантовой информации. Табл. 9, табл. 10 и табл. 11 содержат наборы навыков, рекомендованных для конкретных учебных курсов.

Описание, данное для каждого навыка, является практической рекомендацией для тех, кто в своей работе должен демонстрировать свою способность применять знания и навыки при выполнении рабочих заданий, связанных с квантовыми вычислениями.

RQ3: Какими социальными навыками должны обладать сотрудники, выполняющие квантовые вычисления?

Ученые, работающие в области квантовой информации, опираются на работу физиков, математиков, специалистов, развивающих теорию и практику программирования, а также материаловедов, химиков и инженеров [18]. Междисциплинарные команды применяют квантовую информатику, развивая новые квантовые технологии в области связи, информационных сетей, безопасности данных, навигации и медицинской диагностики (см. рис. 10). Кроме этого, для эффективной командной работы и решения поставленных перед ними задач практические специалисты квантовых вычислений нуждаются в значительных навыках другого рода. Чтобы контролировать ведущиеся проекты, менеджеры квантовых проектов должны обладать глубокими знаниями процессов, способов организации, принципов, политик, информации, культуры, этики, командных навыков и компетенций команды, а также связанных с работами услуг, инфраструктуры и приложений.

Такие “мягкие” навыки, которые мы здесь называем социальными, – это сочетание межличностных, человеческих навыков, навыков общения, понимания черт характера, отношений, карьерных соображений, уровня эмоционального интеллекта и многого другого [129]. Основываясь на этом определении, мы собрали основные социальные навыки, упоминаемые в рассмотренной нами литературе (см. табл. 12). Эти навыки горизонтальны; ими должны владеть и демонстрировать профессионалы в любой дисциплине. Например, в работе [123] представлен отчет для программ физики, выделяющий навыки, требуемые от промышленности. В этой работе авторы выделили две группы навыков, а именно:

Коммуникативные навыки: Цели обучения коммуникативным навыкам включают способность общаться устно и письменно с аудиториями, которые отличаются широким диапазоном приобретенного опыта и наличных потребностей.

Профессиональные навыки и навыки, применяемые на рабочем месте: Цели обучения профессиональным навыкам и навыкам на рабочем месте включают работу в различных командах, понимание свойств соответствующих технологических ресурсов и знакомство с концепциями рабочего места, такими как управление проектами, бюджетирование, оценка качества, а также нормативные и регулятивные вопросы.

В табл. 11 мы собрали литературные источники, систематизацию которых мы проводили и в которых мы встречали описание тех или иных навыков. Кроме того, мы включили в нее некоторые дополнительные использованные нами источники. Необходимо подчеркнуть, что все лидеры отрасли говорили о важности иметь возможность добиться успеха на командных проектах и эффективно доносить технические идеи до широкой аудитории [130].

Социальные навыки обычно приобретаются благодаря опыту, хотя некоторые из них могут быть развиты с помощью учебных программ. Выпускники бакалавриата с профессиональным опытом могут иметь важное значение для ролей, требующих базовых квантовых знаний, в то время как обладатели степени PhD со специализированной квантовой подготовкой часто при изучении вакансий сталкиваются с заниженными требованиями к профессиональному опыту. В работе [131] утверждается, что академические программы должны предлагать несколько точек входа для построения карьеры в квантовой индустрии – для тех, кто еще учится, для обладателей дипломов бакалавра и магистра, для прошедших производственную практику и закончивших аспирантуру. Сочетание традиционного образования с практическим

обучением и участием в реальных проектах будет иметь решающее значение для развития необходимых навыков для востребованных рабочих мест.



Рис. 6. Математика – детализированный перечень концептов для квантовых вычислений.
Fig. 6. Mathematics -detailed list of concepts for quantum computing.



Рис. 7. Физика – детализированный взгляд на фундаментальные концепции.
Fig. 7. Physics -detailed view of fundamental concepts converging to quantum mechanics.

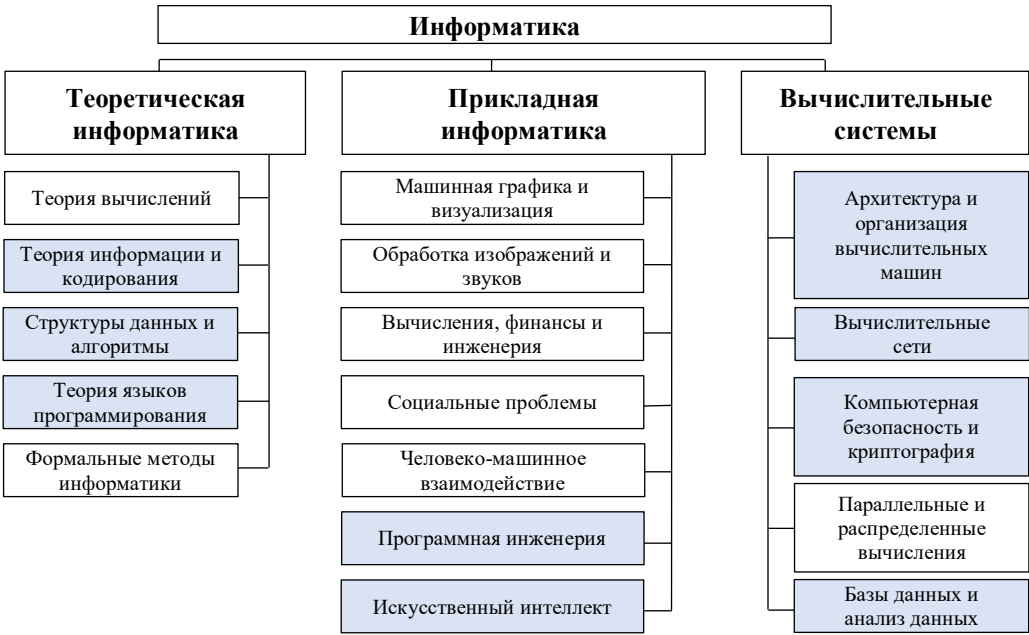


Рис. 8. Информатика – детализированный взгляд на составляющие и смежные дисциплины.
Fig. 8. Computer Science -detailed view of subfields and related disciplines.

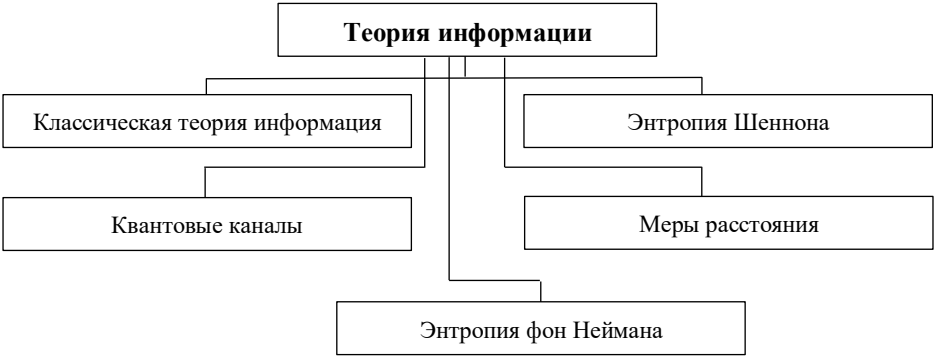


Рис. 9. Информатика – специфическая тематика.
Fig. 9. Computer Science -specific topics.

6. Обсуждение

Основные выводы:

- **Расширение сферы применения:** Наблюдается рост различных областей применения квантовых вычислений, рабочие места заполняются специалистами с образованием в области физики.
- **Охват знаний:** Изучение литературы показывает обширное цитирование квантовых знаний, охватывающее основные понятия из квантовой информатики и связанных дисциплин, таких как квантовая механика, математика и информатика.
- **Образовательные усилия:** Различные и образовательные инициативы направлены на подготовку студентов и специалистов к использованию квантовых вычислений, хотя единого мнения о содержании и глубине курсов еще нет.

Табл. 7. Классификация практических навыков в области квантовых вычислений.
Table 7. Classification of skills for quantum workforce.

Категория	Навыки
Владение теорией квантовой информации для обычного мира	Кодирование; Статистический анализ и анализ данных; Поиск неисправностей (отладка); Источники шума; Моделирование; (Де)когерентность; Исправление ошибок; Динамика открытых систем; Оборудование для кубитов; Гамильтонианы; Проектирование квантовых цепей (физическое).
Навыки квантовой индустрии для возможного курса по традиционной квантовой теории	Линейная алгебра; Статистика (в отношении к измерениям); Гамильтонианы уравнения Шредингера унитарной временной эволюции; Гильбертово пространство; Запутанность; Двухуровневые системы; Спектроскопия; Атомные энергетические уровни и фотонное взаимодействие.
Навыки квантовой индустрии для возможного курса традиционной квантовой теории информации	Линейная алгебра; Статистика (в отношении к измерениям); Источники шума; Проектирование квантовых цепей и вентиляльных моделей; Алгоритмы; Абстрактные кубиты; Теория сложности; Квантовые безопасные коммуникации; Гамильтонианы; Высокопроизводительные вычисления.
Навыки, полезные на рабочих местах квантовой индустрии, для которых рекомендуется читать образовательные курсы по квантовой информатике	Программное обеспечение; Кодирование; Лабораторные навыки и лабораторный опыт; Устранение неисправностей; Материалы; Холодные атомы; Ионные ловушки; Лазерное охлаждение; Магнитооптические ловушки; Конденсаты Бозе-Эйнштейна; Сверхпроводящие цепи; Фотонные интегральные схемы; Высокопроизводительные вычисления; Отжиг.

Табл. 8. Владение теорией квантовой информации для обычного мира.
Table 8. Skills Real-world Quantum Information Theory.

Навык	Описание	Основные источники
Кодирование	Уметь программировать с использованием традиционных алгоритмов, уметь отлаживать программы на квантовом процессоре, уметь собирать и анализировать данные и обсуждать результаты с программистами.	S ₆ , S ₇ , S ₈ , S ₁₅ , S ₂₃ , S ₂₆ , S ₂₇ , S ₃₉ , S ₄₅
Статистический анализ и анализ данных	Уметь уточнять процессы и калибровки компьютера, который участвует в экспериментах, и понимать, какие гипотезы были отвергнуты, а какие доказаны.	S ₂₃ , S ₂₉
Устранение неисправностей (отладка)	Уметь выполнять отладку, радикально отличную от классического варианта, поскольку в классических отладчиках программист имеет возможность расставлять точки останова, а в квантовых программах делать этого нельзя, так как за этим скрывается измерение, разрушающее информацию.	S ₁₅ , S ₄₁ , S ₄₅
Источники шума	Уметь управлять механизмами шумов. Какой вентиляльный автомат используется, на каких принципах он работает, понимать механику декогерентности и шума, а также механику обычных сбоев для обеих моделей квантовых вычислений.	S ₁₆ , S ₅₁
Моделирование	Быть способным понимать, как получить зашумленные данные, понимать, что находится в основе физической модели, в соответствии с которой переносятся эти данные, знать, как очистить эти данные и делать статистически значимые выводы о правильности предложенной модели или о том, как ее улучшить.	S ₂ , S ₃ , S ₄ , S ₈ , S ₁₄ , S ₂₆
(Де) когерентность	Уметь управлять механизмом декогерентности, знать технологию, опираясь на которую оперирует датчик. Для конкретного приложения важно знать, нужна ли в данном случае система с более длительным временем когерентности или система, которую можно легко связать с какой-либо другой системой. Каковы пределы этого связывания?	S ₉ , S ₁₀ , S ₁₁ , S ₁₂ , S ₁₆ , S ₁₇ , S ₂₈ , S ₂₉
Исправление ошибок	Уметь управлять квантовой коррекцией ошибок. Для квантовой коррекции ошибок, проектирования оборудования и моделирования необходимо много знать о физике процессов.	S ₁₁ , S ₁₂ , S ₁₆ , S ₁₇
Динамика открытых систем	Понимать динамику открытой системы и управлять ею. Уравнение Шредингера определяет эволюцию во времени, которая даже в большей степени, чем унитарная динамика, позволяет увидеть и, можно надеяться, понять динамику открытых систем.	S ₄ , S ₇
Оборудование для кубитов	Понимать поведение кубитов, особенно, как (в терминах механизмов декогерентности) распространяется информация.	S ₁₄ , S ₁₆ , S ₄₅
Гамильтонианы	Уметь использовать мощности оператора Гамильтона. Связь абстрактного Гамильтониана с актуальной физической реальностью, конечно же, не очевидна, и ее ограничения нуждаются в тщательном понимании.	S ₄ , S ₄₃
Проектирование квантовых цепей (физическое)	Уметь проектировать квантовые цепи: взять спецификацию квантовой системы в терминах Гамильтониана, превращать ее в проект для изготовления. Здесь есть место для многих микроволновых инженерных решений, и одновременно видна тесная связь с квантованием микроволновых цепей.	S ₃ , S ₁₄ , S ₁₆

Табл. 9. Навыки квантовой индустрии для возможного курса по традиционной квантовой теории.
Table 9. Skills of relevance to the quantum industry for a possible traditional quantum theory course.

Навык	Описание	Дополнительные источники
Линейная алгебра	Уметь на абстрактном уровне использовать/применять линейную алгебру, необходимую для квантовой теории, включая абстрактные векторные пространства, абстрактные операторы, комплексные векторные пространства.	S ₂₃ , S ₂₉
Статистика (в отношении к измерениям)	Уметь строить статистики для измерений. Это необходимо, так как взаимодействие фотонов с атомами имеет статистическую природу.	S ₇ , S ₂₃ , S ₂₉
Гамильтонианы уравнения Шредингера унитарной временной эволюции	Уметь управлять унитарной временной эволюцией. Поскольку временная эволюция описывается уравнением Шредингера, необходимо в достаточной степени обладать пониманием Гамильтонианов и временной эволюции.	S ₄ , S ₇ , S ₄₃
Гильбертово пространство	Уметь работать с Гильбертовым пространством. Каждый член команды участников проекта должен знать, как именно Гильбертово пространство, унитарная временная эволюция, измерения и запутанность связаны с базовыми формализмами квантовой механики.	S ₄ , S ₇ , S ₄₃
Запутанность	Уметь управлять квантовой запутанностью, как одним из наиболее важных понятий.	S ₄ , S ₇ , S ₉ , S ₁₀ , S ₁₁ , S ₁₂ , S ₁₆ , S ₁₇ , S ₄₃ , S ₄₇
Двухуровневые системы	Уметь проектировать двух- и трехуровневые системы, а также разбираться в уравнениях скорости для оптической накачки и истощения.	S ₄ , S ₇ , S ₄₃
Спектроскопия	Быть способным вести полезные обсуждения атомных спектров, делать обоснованные утверждения, наподобие таких, как “это не будет работать, так как правила отбора запрещают переход”.	S ₄ , S ₇ , S ₄₃
Атомные энергетические уровни и фотонное взаимодействие	Понимать, что такое атомные энергетические уровни и фотонное взаимодействие, уметь управлять этими явлениями, то есть иметь знания в области атомной физики, достаточные для вычисления уровней, моделирования и для понимания факторов Франка-Кондона.	S ₄ , S ₇ , S ₄₃

- **Основные темы:** Хотя согласия по конкретным темам для курсов по квантовым вычислениям нет, имеются предложения по ключевым темам, виден и некоторый успех в преподавании на старших курсах и в магистратуре, в то время как потребности индустрии в основном поддерживаются аспирантскими программами.
- **Важность социальных навыков:** В литературе подчеркивается важность социальных навыков из-за междисциплинарного характера квантовых вычислений, подчеркивая этим необходимость эффективной практической работы с разнородными командами.

Выводы по проблемным вопросам:

- **Отсутствие отраслевых стандартов:** В отрасли не выработаны стандарты для определения требований к работе в квантовых вычислениях, а необходимые навыки часто не указываются явно.
- **Отсутствие академического консенсуса:** Нет согласия по темам для курсов квантовых вычислений, что подчеркивает настоятельную необходимость определения ключевых знаний для разработки структурированных, воспроизводимых курсов.
- **Направленность преподавания:** Большинство усилий в области преподавания направлены на программы для выпускников полного курса, но выпускники бакалавриата также востребованы для исполнения технической работы в квантовых вычислениях.

Табл. 10. Навыки квантовой индустрии для возможного курса по традиционной квантовой теории.
Table 10. Skills of relevance to the quantum industry for a possible quantum information theory course.

Навык	Описание	Дополнит. источники
Линейная алгебра	Уметь применять линейную алгебру при объяснении квантовых феноменов и линейные операторы для работы с кубитами. Теоретики и практики должны владеть линейной алгеброй, операциями над матрицами, демонстрировать, что происходит в квантовых цепях.	S ₄ , S ₇ , S ₂₃ , S ₂₉ , S ₄₃
Статистика (в отношении к измерениям)	Уметь применять статистические методы для описания квантовых феноменов, рассматривая квантовую механику в качестве обобщенного примера классической теории вероятностей. Выборка из распределения вероятностей системы.	S ₇ , S ₂₃ , S ₂₉
Источники шума	Уметь работать с зашумленной системой. Таковыми являются квантовые цепи и вентили, а также модели с шумами.	S ₁₁ , S ₁₂ , S ₁₆ , S ₁₇ , S ₅₁
Проектирование квантовых цепей и вентильных моделей	- Понимать и уметь проектировать цепи (свободные от шума) и вентильные модели. Полное моделирование шума, модели вентиля и алгоритмы оптимизации должны быть разделены, так как не все вентили одинаковы. Отсюда следует, что теоретики должны искать новые способы снижения шумов. - Уметь правильно и безошибочно применять все типы вентиля. Не обязательно знать все наизусть, вроде того, какая матрица соответствует вентилю CNOT, а какая вентилю Адамара, но надо уметь показать, что делает система, какое состояние она получит в итоге, как все эти эволюции описываются матрицей-произведением или набором матриц Паули.	S ₃ , S ₁₄ , S ₁₆
Алгоритмы	- Уметь строить и использовать квантовые алгоритмы. Для практической работы требуется понимать модель данных, понимать, как свести ее к некоторому алгоритму, который может быть полезен для решения конкретной задачи. - На практике не требуется помнить все известные алгоритмы, но нужно знать, какие алгоритмы имеют смысл попробовать. - На практике требуется умение разобраться в квантовом алгоритме (а не просто использовать квантовый язык программирования), а также понимать, можно ли решить поставленную задачу с помощью квантового компьютера.	S ₁ , S ₂ , S ₁₃ , S ₁₄ , S ₁₇ , S ₁₉ , S ₄₅ , S ₅₁
Абстрактные кубиты	Уметь интерпретировать абстрактную реализацию кубита: сфера Блоха – это очень полезная иллюстрация пространства состояний кубита, надо хорошо знать этот подход, понимать язык описания абстрактных кубитов, поскольку этот язык используется постоянно и повсеместно.	S ₄ , S ₇ , S ₉ , S ₁₀ , S ₁₁ , S ₁₂ , S ₁₄ , S ₁₆ , S ₁₇ , S ₄₃ , S ₄₅ , S ₄₇
Теория сложности	- Владеть теорией сложности: квантовые компьютеры полностью базируются на информатике, ее теоретических положениях, поэтому нужно знать теорию сложности, уметь упорядочивать алгоритмы по времени их работы, понимать, как теория помогает ускорить решение задачи. - Уметь преодолевать рамки классических представлений, понимать, что, например, алгоритм Шора неструктурированного поиска имеет сложность, пропорциональную корню из N, а не N.	S ₇ , S ₁₀ , S ₁₂ , S ₄₃
Квантовые безопасные коммуникации	Уметь применять квантовые алгоритмы в безопасных коммуникациях. Что такое алгоритмы шифрования, что такое подпись, как будут реализованы некоторые протоколы безопасности.	S ₄ , S ₃₅ , S ₃₆ , S ₃₇ , S ₄₃
Гамильтонианы	Уметь применять операторы Гамильтона к решению задач: с каждой реализацией сверхпроводящего кубита связан некоторый Гамильтониан и энергетический ландшафт. Надо понимать, какой это Гамильтониан, как получить собственные состояния.	S ₄ , S ₄₃
Высоко-производительные вычисления	Уметь применять методы и приемы для высокопроизводительных приложений. Нужно понимать, какие современные суперкомпьютеры нужны для квантовых вычислений, а также для некоторых прикладных работ. Это, например, методы, основанные на квантовых технологиях, которые в конечном итоге были использованы на высокопроизводительных машинах.	S ₃₅ , S ₃₆ , S ₃₇

Табл. 11. Навыки, полезные на рабочих местах квантовой индустрии, для которых рекомендуется читать образовательные курсы по квантовой информатике.

Table 11. Skills of relevance to the quantum industry for a possible hardware for quantum information course.

Навык	Описание	Дополнит. источники
Программное обеспечение	Быть способным продемонстрировать знания и умения вести автоматизированное проектирование систем. Уметь моделировать квантовые системы на платформах Mathematica или MATLAB, или каких-либо других. Уметь не просто писать программы, работать с системами управления версиями, в распределенном окружении, где программистам доступны все результаты их коллег.	S ₃ , S ₄ , S ₈ , S ₂₆ , S ₄₁
Кодирование	Быть способным на основе уже достигнутого результата, понять, как может быть автоматизирован процесс его получения, как сделать некоторые вещи лучше, быстрее и проще. Уметь писать программы: вообще говоря, наличие базовых программистских навыков – это, вероятно, абсолютная необходимость для сотрудников разных специальностей. Уметь взаимодействовать с коллегами при решении программистских задач, то есть при написании программ работать с другими людьми, знать, как совместно писать и ревидировать программ, писать резюме к программам, создавать тестовые наборы. Разбираться в структурах данных и знать, как может выглядеть полезный прикладной интерфейс.	S ₆ , S ₇ , S ₈ , S ₁₅ , S ₂₃ , S ₂₆ , S ₂₇ , S ₃₉
Лабораторные навыки и лабораторный опыт	Уметь проводить эксперименты и реализовывать проекты. Люди, которые покупали дрель в магазине, знают, что перед сверловкой надо наметить центр отверстия. Люди с опытом работы в некотором окружении умеют добиваться большего и работают быстрее, так как знают, что вызывает трудности, а что сделать проще. Люди, которые могут спроектировать экспериментальную программу, могут ее реализовать, подобрать данные, понять, для чего эти данные нужны, а затем решить, что делать дальше.	—
Устранение неисправностей	Уметь решать каждодневные проблемы. <i>Большая часть ежедневных забот – это борьба с программами, борьба с ошибками и выяснение того, что происходит с холодильником.</i>	S ₁₅ , S ₄₁
Материалы	Уметь создавать и оперировать новыми материалами: Люди, ведущие исследования, изготавливающие новые материалы, стараются понять, как привнести эти новые материалы в свои приборы, что будет хорошим теплоизолятором, что хорошо проводит тепло, что имеет хорошую электропроводность, как эти материалы работают друг с другом, какова теплоемкость тех или иных веществ.	S ₄ , S ₇ , S ₄₃
Холодные атомы	Знать о лазерах, длинах волн, оптических компонентах, управлении, рассеянном свете и методах измерений.	S ₄ , S ₇ , S ₄₃
Ионные ловушки	Понимать, что такое технология ионных ловушек, взаимодействие ионов с электроникой, физика самого процесса улавливания ионов, например, уравнения Маттье, области устойчивости.	S ₄ , S ₇ , S ₄₃
Лазерное охлаждение	Понимать и уметь применять материал для лазерного охлаждения, использовать свет для охлаждения атомов, оптических волокон, различных детекторов, электрооптики, акустической оптики.	—
Магнито-оптические ловушки	Уметь работать с материалами магнитооптических ловушек. Построение таких ловушек и улавливающих атомов, опыт, полученный при этом, более ценен, чем получение производных материалов.	S ₄ , S ₇ , S ₄₃
Конденсаты Бозе-Эйнштейна	Уметь работать с соответствующими материалами и объяснять их поведение. Если кто-то помещает некоторый конденсат в ловушку, которая его детектирует с некоторым фазовым сдвигом или еще как-то, нужно понимать теорию процесса, а тот, кто выполнил такую работу, уметь сделать доклад с объяснением эффекта.	S ₄ , S ₇ , S ₄₃
Сверхпроводящие цепи	Уметь манипулировать и понимать полупроводниковые цепи. Если кто-то исследует время когеренции или нечто похожее, ему/ей необходимо получить множество сведений по материаловедению и проектированию квантовых цепей и понять мельчайшие детали того, как изготавливается сверхпроводящий кубит, где находятся поля и что имеет значение для когерентных связей.	S ₃ , S ₁₄ , S ₁₆
Фотонные интегральные схемы	Уметь манипулировать и понимать фотонные интегральные схемы. Чтобы этого добиться, нужно уметь строить кольцевые резонаторы; знать, как работать со стандартными фотонными интегральными схемами, например, в литейном цехе.	S ₃ , S ₄ , S ₇ , S ₁₄ , S ₁₆ , S ₄₃
Высокопроизводительные вычисления	Быть способным демонстрировать экспертные знания высокопроизводительных вычислений, поскольку в настоящее время множество инженерных задач решается с применением компьютерного моделирования, а значит, при проектировании оборудования необходимо строить программные модели.	S ₃₅ , S ₃₆ , S ₃₇
Отжиг	Знать, что такое (квантовый) отжиг и принципы, на которых он работает.	S ₄ , S ₇ , S ₄₃

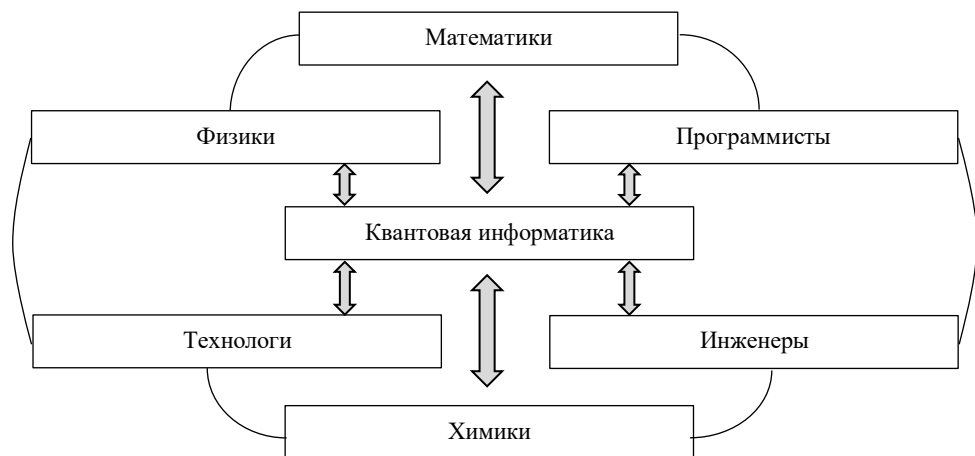


Рис. 10. Междисциплинарные команды специалистов по квантовым вычислениям.
Fig. 10. Cross-disciplinary teamwork of quantum computing practitioners.

Табл. 12. Основные социальные навыки, необходимые для индустрии квантовых вычислений.
Table 12. Main soft skills required for the quantum computing industry.

Социальный навык	Источники
Аналитическое/критическое/творческое мышление	S ₃ , S ₂₀ , S ₂₂ , S ₂₃ , S ₃₃ , S ₃₄
Взаимоотношения	S ₂₀ , S ₂₂ , S ₂₆ , S ₃₄ , S ₄₂
Умение управлять временем	S ₂₂ , S ₃₃ , S ₃₄ , [123]
Командная работа	S ₂₂ , S ₃₃ , S ₃₄ , [123]
Устное/письменное взаимодействие с людьми	S ₂₂ , S ₃₃ , S ₃₄ , [123]
Активное обучение/любопытство	S ₂₂ , S ₃₄ , [123]
Самостоятельность, сопряженная с пониманием, когда надо обратиться за помощью	S ₂₂ , S ₃₃ , S ₃₄ , [123]
Способность к междисциплинарной работе	S ₂₂ , S ₃₃ , S ₃₄ , [123]
Умение справляться с двусмысленностями	S ₂₂ , S ₂₃ , S ₄₂
Лидерство и социальное влияние	S ₂₂ , S ₂₃ , S ₃₃ , S ₃₄

7. Заключение

Квантовые вычисления – это новая развивающаяся область, которая может кардинально изменить наши представления о вычислениях и программировании. Сложность, унаследованная от квантовой механики, затрудняет занятия квантовыми вычислениями профессионалам, не знающим физику [73].

Важнейшей задачей развития возможностей персонала является обучение различных групп не проходивших специальный отбор студентов колледжей и университетов навыкам работы с квантовыми вычислениями, для которых которые необходим существенный теоретический базис [132].

На нынешнем этапе второй квантовой революции работа в компаниях-разработчиках и разработка квантовых компьютеров все еще, как правило, требует научного багажа подготовки на уровне подготовки кандидата наук (степени PhD). Однако растущее предложение «квантово-близких» рабочих мест в отрасли также требует квантовой грамотности. Запросы требуют знаний программирования, умения вести разработку программного обеспечения, алгоритмов, владения знаниями электроники, криогеники и

вакуумных технологий [38]. Исходя из этого, для повышения квалификации сотрудников до уровня, необходимого индустрии квантовых вычислений, требуется разработать учебные планы и создать образовательные программы бакалавриата в области квантовых информационных технологий.

Несмотря на некоторые инициативы по созданию учебных пособий и образовательных программ, интеграция квантовых вычислений в информатику, инженерии и связанные с ними учебные планы остается сложной задачей. До сих пор нет консенсуса по тематикам курсов и их последовательности, необходимым для подготовки будущих специалистов.

Пытаясь внести свой вклад в решение назревших задач, в этом отчете мы представляем обзор литературы, вносящий в нее некоторую систематизацию, которая позволила нам выделить следующие вопросы:

- 1) Полный набор знаний, связанных с квантовыми вычислениями, включая фундаментальные основы физики, квантовой механики, квантовой информатики, математики, информатики и смежных дисциплин.
- 2) Набор технических навыков (связанных с фундаментальными понятиями квантовых вычислений) с описанием конкретных способностей, связанных с компетенциями участников квантовых вычислений. Эти навыки называются техническими или “жесткими” навыками.
- 3) Набор “мягких” навыков, называемых в этой статье “социальными”, представляющих собой навыки, требуемые при производстве программного обеспечения, к которым также относятся некоторые конкретные навыки, требуемые самим существом квантовых вычислений.

Будущая работа. Сформулированы следующие инициативы, учитывающие необходимость руководящих принципов для развития навыков в области квантовых вычислений и хорошо подготовленной рабочей силы для этой известной отрасли.

- 1) Определить степень детализации, глубины и сложности квантовых тем, которые должны преподаваться на каждом образовательном уровне.
- 2) Сопоставить результаты этого исследования с новейшими версиями стандарта SWEBOOK.

References

- [1]. S. Aralikatti, “Quantum Computing: Challenges and Opportunities,” in 2021 Fourth International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT), 2021, pp. 1–4. doi: 10.1109/ICECCT52121.2021.9616647.
- [2]. National Academies of Sciences, Engineering, and and Medicine, Quantum Computing: Progress and Prospects. Washington, DC: The National Academies Press, 2019.
- [3]. M. Piattini, G. Peterssen, and R. Pérez-Castillo, “Quantum Computing: A New Software Engineering Golden Age,” SIGSOFT Softw. Eng. Notes, vol. 45, no. 3, pp. 12–14, Jul. 2020, doi: 10.1145/3402127.3402131.
- [4]. B. Lee, C. Y. Liu, and M. L. J. Apuzzo, “Quantum Computing: A Prime Modality in Neurosurgery’s Future,” World Neurosurg, vol. 78, no. 5, pp. 404–408, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2012.07.013>.
- [5]. S. T. Marella and H. S. K. Parisa, “Introduction to Quantum Computing,” in Quantum Computing and Communications, Y. Zhao, Ed., Rijeka: IntechOpen, 2020, p. Ch. 5. doi: 10.5772/intechopen.94103.
- [6]. J. Singh and M. Singh, “Evolution in Quantum Computing,” in 2016 International Conference System Modeling & Advancement in Research Trends (SMART), 2016, pp. 267–270. doi: 10.1109/SYSMART.2016.7894533.
- [7]. Z. MENG, “Review of Quantum Computing,” in 2020 13th International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA), 2020, pp. 210–213. doi: 10.1109/ICICTA51737.2020.00051.
- [8]. Draup, “Quantum Computing Talent Ecosystem Analysis,” Nov. 2020.

- [9]. E. Rieffel and W. Polak, *QUANTUM COMPUTING A Gentle Introduction*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 2011.
- [10]. N. S. Yanofsky and M. A. Mannucci, *Quantum computing for computer scientists*. New York, NY: Cambridge University Press, 2008.
- [11]. T. G. Wong, *Introduction to Classical and Quantum Computing*. Omaha, Nebraska: Rooted Grove, 2022.
- [12]. E. Rieffel and W. Polak, "An Introduction to Quantum Computing for Non-Physicists," *ACM Comput. Surv.*, vol. 32, no. 3, pp. 300–335, Sep. 2000, doi: 10.1145/367701.367709.
- [13]. B. Bungum and S. Selstø, "What do quantum computing students need to know about quantum physics?," *Eur J Phys*, vol. 43, no. 5, p. 055706, 2022, doi: 10.1088/1361-6404/ac7e8a.
- [14]. N. Bohr, "I. On the constitution of atoms and molecules," *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, vol. 26, no. 151, pp. 1–25, Jul. 1913, doi: 10.1080/14786441308634955.
- [15]. W. Heisenberg, "On the quantum theory of line structure and anomalous Zeeman effect," *Journal of Physics*, vol. 8, Dec. 1922.
- [16]. E. Schrödinger, "Quantization as an eigenvalue problem (Part I)," *Annalen der Physics*, vol. 384, no. 4, pp. 361–376, 1926.
- [17]. P. Dirac, "The quantum theory of the electron," *Proceedings of the Royal Society Series A*, vol. 117, no. 778, p. 610-624, Feb. 1928.
- [18]. E. E. Edwards, "Key Concepts for Future QIS Learners", *Illinois Quantum Information Science and Technology Center*.
- [19]. G. Arun and V. Mishra, "A review on quantum computing and communication," in *2014 2nd International Conference on Emerging Technology Trends in Electronics, Communication and Networking*, 2014, pp. 1–5. doi: 10.1109/ET2ECN.2014.7044953.
- [20]. V. Verma, "A Study on Quantum Cryptography and Its Need," in *Quantum Computing: A Shift from Bits to Qubits*, R. Pandey, N. Srivastava, N. K. Singh, and K. Tyagi, Eds., Singapore: Springer Nature Singapore, 2023, pp. 407–435. doi: 10.1007/978-981-19-9530-9_21.
- [21]. J. Preskill, "Simulating quantum field theory with a quantum computer," in *The 36th Annual International Symposium on Lattice Field Theory -LATTICE2018*, A. Bazavov, A. X. El-Khadra, S. Gottlieb, R. Lewis, H.-W. Lin, K.-F. Liu, Y. Meurice, J. Osbor, and A. Shindler, Eds., East Lansing, Michigan, USA.: *Proceedings of Science*, Nov. 2018, pp. 1–22.
- [22]. V. Armaos, D. A. Badounas, P. Deligiannis, and K. Lianos, "Computational chemistry on quantum computers," *Applied Physics A*, vol. 126, no. 8, p. 625, 2020, doi: 10.1007/s00339-020-03755-4.
- [23]. N. Kiefl and G. Hagel, "Software Engineering Education of Classical Computing vs. Quantum Computing: A Competency-Centric Approach," in *Proceedings of the 4th European Conference on Software Engineering Education*, in *ECSEE '20*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2020, pp. 27–31. doi: 10.1145/3396802.3396816.
- [24]. C. Cartiere, *Quantum Software Engineering: Introducing Formal Methods into Quantum Computing*. 2016.
- [25]. M. Paltenghi and M. Pradel, "Bugs in Quantum Computing Platforms: An Empirical Study," *Proc. ACM Program. Lang.*, vol. 6, no. OOPSLA1, Apr. 2022, doi: 10.1145/3527330.
- [26]. R. Shaydulin, C. Thomas, and P. Rodeghero, "Making Quantum Computing Open: Lessons from Open Source Projects," in *Proceedings of the IEEE/ACM 42nd International Conference on Software Engineering Workshops*, in *ICSEW'20*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2020, pp. 451–455. doi: 10.1145/3387940.3391471.
- [27]. "QP4SE 2022: Proceedings of the 1st International Workshop on Quantum Programming for Software Engineering," New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2022.
- [28]. J. Zhao, *Quantum Software Engineering: Landscapes and Horizons*. 2020.
- [29]. M. A. Akbar, A. A. Khan, S. Mahmood, and S. Rafi, "Quantum Software Engineering: A New Genre of Computing," Nov. 2022, Accessed: Mar. 18, 2023. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2211.13990>
- [30]. A. Sarkar, "Automated Quantum Software Engineering: why? what? how?," Dec. 2022, doi: 10.48550/arxiv.2212.00619.
- [31]. M. Piattini and J. M. Murillo, "Quantum Software Engineering Landscape and Challenges," in *Quantum Software Engineering*, M. A. Serrano, R. Pérez-Castillo, and M. Piattini, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2022, pp. 25–38. doi: 10.1007/978-3-031-05324-5_2.
- [32]. M. De Stefano, F. Pecorelli, D. Di Nucci, F. Palomba, and A. De Lucia, "Software Engineering for Quantum Programming: How Far Are We?," Mar. 2022, doi: 10.48550/arxiv.2203.16969.

- [33]. A. Cobb, J.-G. Schneider, and K. Lee, "Towards Higher-Level Abstractions for Quantum Computing," in Proceedings of the 2022 Australasian Computer Science Week, in ACSW '22. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2022, pp. 115–124. doi: 10.1145/3511616.3513106.
- [34]. R. Juárez-Ramírez, S. Jiménez, C. X. Navarro, C. Guerra-García, H. G. Perez-Gonzalez, C. Fernández-y-Fernández, J. Ortiz-Hernández, and K. Cancino, "Skills required for Quantum Computing: A comprehensive review of recent Studies", Programming and Computer Software, vol. 50, no. 8, 2024.
- [35]. R. Abreu, S. Ali, T. Yue, M. Felderer, and I. Exman, "Quantum Software: Model-Driven or Search-Driven? A Q-SE 2021 Workshop Report," SIGSOFT Softw. Eng. Notes, vol. 46, no. 4, pp. 23–25, Oct. 2021, doi: 10.1145/3485952.3485958.
- [36]. C. Hughes, D. Finke, D.-A. German, C. Merzbacher, P. M. Vora, and H. J. Lewandowski, "Assessing the Needs of the Quantum Industry," Aug. 2021, doi: 10.48550/arxiv.2109.03601.
- [37]. A. Purohit, M. Kaur, Z. C. Seskir, M. T. Posner, and A. Venegas-Gomez, "Building a quantum-ready ecosystem," IET Quantum Communication, vol. 5, no. 1, pp. 1–18, Mar. 2024, doi: <https://doi.org/10.1049/qtc2.12072>.
- [38]. C. Singh, A. T. Asfaw, and J. Levy, "Preparing students to be leaders of the quantum information revolution," Phys Today, 2021.
- [39]. A. German, M. Pias, and Q. Xiang, "On the Design and Implementation of a Quantum Architectures Knowledge Unit for a CS Curriculum," in Proceedings of the 54th ACM Technical Symposium on Computer Science Education V. 1, in SIGCSE 2023. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2023, pp. 1150–1156. doi: 10.1145/3545945.3569845.
- [40]. P. Bourque and R. E. Fairley, "Guide to the Software Engineering Body of Knowledge, Version 3.0," 2014.
- [41]. L. Gatti and R. Sotelo, "Quantum Computing for Undergraduate Engineering Students: Report of an Experience," in 2021 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE), 2021, pp. 397–401. doi: 10.1109/QCE52317.2021.00060.
- [42]. A. Miranskyy, M. Khan, J. P. L. Faye, and U. C. Mendes, "Quantum computing for software engineering: prospects," in Proceedings of the 1st International Workshop on Quantum Programming for Software Engineering, in QP4SE 2022. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2022, pp. 22–25. doi: 10.1145/3549036.3562060.
- [43]. N. Abbas, J. Andersson, and D. Weyns, "ASPLe: A methodology to develop self-adaptive software systems with systematic reuse," Journal of Systems and Software, vol. 167, p. 110626, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jss.2020.110626>.
- [44]. A. Filieri et al., "Control Strategies for Self-Adaptive Software Systems," ACM Trans. Auton. Adapt. Syst., vol. 11, no. 4, Feb. 2017, doi: 10.1145/3024188.
- [45]. H. Alsolai and M. Roper, "A systematic literature review of machine learning techniques for software maintainability prediction," Inf Softw Technol, vol. 119, p. 106214, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2019.106214>.
- [46]. Y. Liu, S. Arunachalam, and K. Temme, "A rigorous and robust quantum speed-up in supervised machine learning," Nat Phys, vol. 17, no. 9, pp. 1013–1017, Jul. 2021, doi: 10.1038/s41567-021-01287-z.
- [47]. B. S. Ahmed, "Test case minimization approach using fault detection and combinatorial optimization techniques for configuration-aware structural testing," Engineering Science and Technology, an International Journal, vol. 19, no. 2, pp. 737–753, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2015.11.006>.
- [48]. C. Gambella and A. Simonetto, "Multiblock ADMM Heuristics for Mixed-Binary Optimization on Classical and Quantum Computers," IEEE Transactions on Quantum Engineering, vol. 1, pp. 1–22, 2020, doi: 10.1109/TQE.2020.3033139.
- [49]. L. Braine, D. J. Egger, J. Glick, and S. Woerner, "Quantum Algorithms for Mixed Binary Optimization Applied to Transaction Settlement," IEEE Transactions on Quantum Engineering, vol. 2, pp. 1–8, 2021, doi: 10.1109/TQE.2021.3063635.
- [50]. F. Horváth, T. Gergely, Á. Beszédes, D. Tengeri, G. Balogh, and T. Gyimóthy, "Code coverage differences of Java bytecode and source code instrumentation tools," Software Quality Journal, vol. 27, no. 1, pp. 79–123, 2019, doi: 10.1007/s11219-017-9389-z.
- [51]. A. Miranskyy, A. Hamou-Lhadj, E. Cialini, and A. Larsson, "Operational-Log Analysis for Big Data Systems: Challenges and Solutions," IEEE Softw, vol. 33, no. 2, pp. 52–59, 2016, doi: 10.1109/MS.2016.33.
- [52]. J. Sevilla and C. Riedel, Forecasting timelines of quantum computing. 2020.

- [53]. T. Iqbal, P. Elahidoost, and L. Lúcio, "A Bird's Eye View on Requirements Engineering and Machine Learning," in 2018 25th Asia-Pacific Software Engineering Conference (APSEC), 2018, pp. 11–20. doi: 10.1109/APSEC.2018.00015.
- [54]. T. L. Frantz, "A Conversation with Terrill Frantz, Associate Professor of eBusiness and Cybersecurity, Harrisburg University," Jun. 04, 2021.
- [55]. T. Plunkett, T. L. Frantz, H. Khatri, P. Rajendran, and S. Midha, "A Survey of Educational Efforts to Accelerate a Growing Quantum Workforce," in 2020 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE), 2020, pp. 330–336. doi: 10.1109/QCE49297.2020.00048.
- [56]. Y. Sedelmaier and D. Landes, "A Research Agenda for Identifying and Developing Required Competencies in Software Engineering," *International Journal of Engineering Pedagogy*, vol. 3, pp. 30–35, Apr. 2013, doi: 10.3991/ijep.v3i2.2448.
- [57]. B. Bloom, M. Engelhart, E. Furst, W. Hill, and D. Krathwohl, *Taxonomy of educational objectives: the classification of educational goals. Handbook I: cognitive domain*. New York: McKay and Longman, 1956.
- [58]. L. Anderson and D. Krathwohl, *A taxonomy for learning, teaching, and assessing: A revision of Bloom's taxonomy of educational objectives*. 2001.
- [59]. K. Petersen, R. Feldt, S. Mujtaba, and M. Mattsson, "Systematic Mapping Studies in Software Engineering," pp. 1–10, 2008, doi: 10.14236/ewic/EASE2008.8.
- [60]. B. Barn, S. Barat, and T. Clark, "Conducting Systematic Literature Reviews and Systematic Mapping Studies," in *Proceedings of the 10th Innovations in Software Engineering Conference*, in ISEC '17. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2017, pp. 212–213. doi: 10.1145/3021460.3021489.
- [61]. K. Petersen, S. Vakkalanka, and L. Kuzniarz, "Guidelines for conducting systematic mapping studies in software engineering: An update," *Inf Softw Technol*, vol. 64, pp. 1–18, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2015.03.007>.
- [62]. B. Kitchenham and S. Charters, "Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering," Technical report, EBSE Technical Report EBSE-2007-01, 2007. [Online]. Available: <https://www.cs.auckland.ac.nz/~norsaremah/2007%20Guidelines%20for%20performing%20SLR%20in%20SE%20v2.3.pdf>
- [63]. B. A. Kitchenham, "Systematic reviews," in *10th International Symposium on Software Metrics*, 2004. Proceedings., 2004, pp. xii–xii. doi: 10.1109/METRIC.2004.1357885.
- [64]. J. Hannay, D. Sjøberg, and T. Dybå, "A Systematic Review of Theory Use in Software Engineering Experiments," *Software Engineering, IEEE Transactions on*, vol. 33, pp. 87–107, Mar. 2007, doi: 10.1109/TSE.2007.12.
- [65]. G. Tebes, D. Peppino, P. Becker, and L. Olsina, *Enhancing the Process Specification for Systematic Literature Reviews*. 2019. doi: 10.13140/RG.2.2.14262.96321/1.
- [66]. P. Brereton, B. A. Kitchenham, D. Budgen, M. Turner, and M. Khalil, "Lessons from applying the systematic literature review process within the software engineering domain," *Journal of Systems and Software*, vol. 80, no. 4, pp. 571–583, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jss.2006.07.009>.
- [67]. B. Kitchenham, E. Mendes, and G. Travassos, "Cross versus Within-Company Cost Estimation Studies: A Systematic Review," *Software Engineering, IEEE Transactions on*, vol. 33, pp. 316–329, Jun. 2007, doi: 10.1109/TSE.2007.1001.
- [68]. M. R. W. Hiebl, "Sample Selection in Systematic Literature Reviews of Management Research," *Organ Res Methods*, vol. 26, no. 2, pp. 229–261, Jan. 2021, doi: 10.1177/1094428120986851.
- [69]. V. Garousi, M. Felderer, and M. V. Mäntylä, "Guidelines for including grey literature and conducting multivocal literature reviews in software engineering," *Inf Softw Technol*, vol. 106, pp. 101–121, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2018.09.006>.
- [70]. B. Weder, J. Barzen, F. Leymann, and D. Vietz, "Quantum Software Development Lifecycle," Jun. 2021, doi: 10.48550/arxiv.2106.09323.
- [71]. A. A. Khan et al., "Software Architecture for Quantum Computing Systems -- A Systematic Review," Feb. 2022, Accessed: Mar. 18, 2023. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2202.05505>
- [72]. M. A. Serrano, J. A. Cruz-Lemus, R. Perez-Castillo, and M. Piattini, "Quantum Software Components and Platforms: Overview and Quality Assessment," *ACM Comput. Surv.*, vol. 55, no. 8, Dec. 2022, doi: 10.1145/3548679.
- [73]. L. Westfall and A. Leider, "Teaching Quantum Computing: Volume 2," 2019, pp. 63–80. doi: 10.1007/978-3-030-02683-7_6.

- [74]. R. Juárez-Ramírez et al., “A Taxonomic View of the Fundamental Concepts of Quantum Computing—A Software Engineering Perspective,” *Programming and Computer Software*, vol. 49, no. 8, pp. 682–704, 2023, doi: 10.1134/S0361768823080108.
- [75]. M. Mykhailova and K. M. Svore, “Teaching Quantum Computing through a Practical Software-Driven Approach: Experience Report,” in *Proceedings of the 51st ACM Technical Symposium on Computer Science Education*, in SIGCSE '20. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2020, pp. 1019–1025. doi: 10.1145/3328778.3366952.
- [76]. M. A. Cusumano, “The business of quantum computing,” *Commun. ACM*, vol. 61, no. 10, pp. 20–22, Sep. 2018, doi: 10.1145/3267352.
- [77]. S. Seegerer, T. Michaeli, and R. Romeike, “Quantum Computing As a Topic in Computer Science Education,” in *Proceedings of the 16th Workshop in Primary and Secondary Computing Education*, in WiPSCE '21. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2021. doi: 10.1145/3481312.3481348.
- [78]. R. Abreu, S. Ali, and T. Yue, “First International Workshop on Quantum Software Engineering (Q-SE 2020),” *SIGSOFT Softw. Eng. Notes*, vol. 46, no. 2, pp. 30–32, Mar. 2021, doi: 10.1145/3448992.3449000.
- [79]. J. D. Weisz, M. Ashoori, and Z. Ashktorab, “Entanglion: A Board Game for Teaching the Principles of Quantum Computing,” in *Proceedings of the 2018 Annual Symposium on Computer-Human Interaction in Play*, in CHI PLAY '18. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2018, pp. 523–534. doi: 10.1145/3242671.3242696.
- [80]. M. De Vincentiis, F. Cassano, A. Pagano, and A. Piccinno, “QAI4ASE: Quantum artificial intelligence for automotive software engineering,” in *Proceedings of the 1st International Workshop on Quantum Programming for Software Engineering*, in QP4SE 2022. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2022, pp. 19–21. doi: 10.1145/3549036.3562059.
- [81]. P. P. Angara, U. Stege, H. A. Müller, and M. Bozzo-Rey, “Hybrid quantum-classical problem solving in the NISQ era,” in *Proceedings of the 30th Annual International Conference on Computer Science and Software Engineering*, in CASCON '20. USA: IBM Corp., 2020, pp. 247–252.
- [82]. Z. Ashktorab, J. D. Weisz, and M. Ashoori, “Thinking Too Classically: Research Topics in Human-Quantum Computer Interaction,” in *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, in CHI '19. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2019, pp. 1–12. doi: 10.1145/3290605.3300486.
- [83]. B. C. Sanders, “Building a quantum computer (invited),” in *Proceedings of the Workshop on System-Level Interconnect: Problems and Pathfinding Workshop*, in SLIP '20. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2020. doi: 10.1145/3414622.3431913.
- [84]. D. Franklin et al., “Exploring Quantum Reversibility with Young Learners,” in *Proceedings of the 2020 ACM Conference on International Computing Education Research*, in ICER '20. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2020, pp. 147–157. doi: 10.1145/3372782.3406255.
- [85]. T. Gabor et al., “The Holy Grail of Quantum Artificial Intelligence: Major Challenges in Accelerating the Machine Learning Pipeline,” in *Proceedings of the IEEE/ACM 42nd International Conference on Software Engineering Workshops*, in ICSEW'20. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2020, pp. 456–461. doi: 10.1145/3387940.3391469.
- [86]. H. Neeman et al., “Cyberinfrastructure Facilitation Skills Training via the Virtual Residency Program,” in *Practice and Experience in Advanced Research Computing*, in PEARC '20. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2020, pp. 421–428. doi: 10.1145/3311790.3396629.
- [87]. C. de O. Melo and T. C. de Sousa, “Reflections on cyberethics education for millennial software engineers,” in *Proceedings of the 1st International Workshop on Software Engineering Curricula for Millennials*, in SECM '17. IEEE Press, 2017, pp. 40–46. doi: 10.1109/SECM.2017.10.
- [88]. T. Liu, D. Gonzalez-Maldonado, D. B. Harlow, E. E. Edwards, and D. Franklin, “Qupcakery: A Puzzle Game that Introduces Quantum Gates to Young Learners,” in *Proceedings of the 54th ACM Technical Symposium on Computer Science Education V. 1*, in SIGCSE 2023. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2023, pp. 1143–1149. doi: 10.1145/3545945.3569837.
- [89]. O. Weiser, Y. M. Kalman, C. Kent, and G. Ravid, “65 competencies: which ones should your data analytics experts have?”, *Commun. ACM*, vol. 65, no. 3, pp. 58–66, Feb. 2022, doi: 10.1145/3467018.
- [90]. W. Aucchuasi, G. B. Santiago, E. O. Núñez, and F. Sernaque, “Interactive online tool as an instrument for learning mathematics through programming techniques, aimed at high school students,” in *Proceedings*

- of the 6th International Conference on Information Technology: IoT and Smart City, in ICIT '18. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2018, pp. 70–76. doi:10.1145/3301551.3301580.
- [91]. N. Dneprovskaya, S.-B. Chris Kang, and I. Shevtsova, “Evolution of the Competencies to Embrace Digital Technology for Sustainable Development,” in Extended Abstracts of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, in CHI EA '22. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2022. doi: 10.1145/3491101.3519730.
- [92]. C. Teuscher, “A golden age for computing frontiers, a dark age for computing education?,” in Proceedings of the 18th ACM International Conference on Computing Frontiers, in CF '21. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2021, pp. 140–143. doi: 10.1145/3457388.3458673.
- [93]. W. Mauerer, S. Klessinger, and S. Scherzinger, “Beyond the badge: reproducibility engineering as a lifetime skill,” in Proceedings of the 4th International Workshop on Software Engineering Education for the Next Generation, in SEENG '22. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2023, pp. 1–4. doi: 10.1145/3528231.3528359.
- [94]. I. Arawjo, “To Write Code: The Cultural Fabrication of Programming Notation and Practice,” in Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, in CHI '20. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2020, pp. 1–15. doi: 10.1145/3313831.3376731.
- [95]. M. Pias, B. Becker, Q. Xiang, M. Zahran, and M. Anderson, “Should Quantum Processor Design be Considered a Topic in Computer Architecture Education?,” in Proceedings of the 53rd ACM Technical Symposium on Computer Science Education V. 2, in SIGCSE 2022. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2022, p. 1184. doi: 10.1145/3478432.3499201.
- [96]. Y. Huang and M. Martonosi, “Statistical assertions for validating patterns and finding bugs in quantum programs,” in Proceedings of the 46th International Symposium on Computer Architecture, in ISCA '19. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2019, pp. 541–553. doi: 10.1145/3307650.3322213.
- [97]. J. Fitzjohn, A. Winkles, G. Wilson, and D. Vicinanza, “A Software Development Kit and Translation Layer for Executing Intel 8080 Assembler on a Quantum Computer (August 2022),” *IEEE Transactions on Quantum Engineering*, vol. 3, pp. 1–12, 2022, doi: 10.1109/TQE.2022.3204653.
- [98]. S. Beniwal, “Need and Challenges in Quantum Computing in Fog Environment,” in 2023 10th International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom), 2023, pp. 175–180.
- [99]. K. Prateek and S. Maity, “Quantum Programming on Azure Quantum—An Open Source Tool for Quantum Developers,” in *Quantum Computing: A Shift from Bits to Qubits*, R. Pandey, N. Srivastava, N. K. Singh, and K. Tyagi, Eds., Singapore: Springer Nature Singapore, 2023, pp. 283–309. doi: 10.1007/978-981-19-9530-9_16.
- [100]. S. Smuts and H. Smuts, “Society 5.0 and the future of work skills for software engineers and developers,” in Proceedings of the Society 5.0 Conference 2022 - Integrating Digital World and Real World to Resolve Challenges in Business and Society, K. Hinkelmann and A. Gerber, Eds., in *EPiC Series in Computing*, vol. 84. EasyChair, 2022, pp. 169–182. doi: 10.29007/9kzd.
- [101]. A. Bayerstadler et al., “Industry quantum computing applications,” *EPJ Quantum Technol*, vol. 8, no. 1, p. 25, 2021, doi: 10.1140/epjqt/s40507-021-00114-x.
- [102]. R. B. Shapiro and M. Tissenbaum, “New Programming Paradigms,” *The Cambridge Handbook of Computing Education Research*, 2019, [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:86591035>
- [103]. J. Hooyberghs, *Introducing Microsoft Quantum Computing for Developers: Using the Quantum Development Kit and Q#*. 2021. doi: 10.1007/978-1-4842-7246-6.
- [104]. A. Razak et al., “Chapter Seven - Reigniting the power of artificial intelligence in education sector for the educators and students competence”, in *Artificial Intelligence and Machine Learning in Smart City Planning*, V. Basetti, C. K. Shiva, M. R. Ungarala, and S. S. Rangarajan, Eds., Elsevier, 2023, pp. 103–116. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99503-0.00009-0>.
- [105]. F. Amato et al., “QuantuMoonLight: A low-code platform to experiment with quantum machine learning”, *SoftwareX*, vol. 22, p. 101399, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.softx.2023.101399>.
- [106]. R. Kurt, “Industry 4.0 in Terms of Industrial Relations and Its Impacts on Labour Life”, *Procedia Comput Sci*, vol. 158, pp. 590–601, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.09.093>.
- [107]. R. Verdecchia, P. Lago, and C. de Vries, “The future of sustainable digital infrastructures: A landscape of solutions, adoption factors, impediments, open problems, and scenarios,” *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, vol. 35, p. 100767, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2022.100767>.

- [108]. N. O. E. Olsson, E. Arica, R. Woods, and J. A. Madrid, "Industry 4.0 in a project context: Introducing 3D printing in construction projects," *Project Leadership and Society*, vol. 2, p. 100033, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.plas.2021.100033>.
- [109]. G. Morra, D. A. Yuen, H. M. Tufo, and M. G. Knepley, "Fresh Outlook on Numerical Methods for Geodynamics. Part 2: Big Data, HPC, Education" in *Encyclopedia of Geology (Second Edition)*, D. Alderton and S. A. Elias, Eds., Oxford: Academic Press, 2021, pp. 841–855. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102908-4.00111-9>.
- [110]. F. Greinert and R. Müller, *Competence Framework for Quantum Technologies, Version 2.0*. Quantum Flagship, 2023.
- [111]. M. A. Nielsen, "Quantum information theory." 2000.
- [112]. M. A. Nielsen and I. L. Chuang, *Quantum Computation and Quantum Information*, 10th edition. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2016.
- [113]. C. E. Shannon and W. Weaver, *The Mathematical Theory of Communication*, 16th edition. The University of Illinois Press, 1971.
- [114]. E. Sakai, "On the principles of quantum mechanics," May 2004, doi: 10.48550/arxiv.quant-ph/0405069.
- [115]. A. Karel Velan, "Basic Principles of Quantum Mechanics," in *The Multi-Universe Cosmos: The First Complete Story of the Origin of the Universe*, A. Karel Velan, Ed., Boston, MA: Springer US, 1992, pp. 21–33. doi: 10.1007/978-1-4684-6030-8_3.
- [116]. J. Bub, "Quantum Mechanics as a Principle Theory," *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, vol. 31, no. 1, pp. 75–94, 2000, doi: [https://doi.org/10.1016/S1355-2198\(99\)00032-5](https://doi.org/10.1016/S1355-2198(99)00032-5).
- [117]. J. J. Sakurai, *Modern Quantum Mechanics*, 1st edition. Reading, MA: Addison-Wesley, 1994.
- [118]. J. Singh and K. S. Bhangu, "Contemporary Quantum Computing Use Cases: Taxonomy, Review and Challenges," *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 30, no. 1, pp. 615–638, 2023, doi: 10.1007/s11831-022-09809-5.
- [119]. R. Feynman, R. Leighton, M. Sands, and B. Lindsay, "The Feynman Lectures on Physics, Vol. 3: Quantum Mechanics," *Phys Today*, vol. 19, no. 11, 1966.
- [120]. S. Gasirowicz, *Quantum Physics*, 2nd. edition. New York: Wiley, 1995.
- [121]. B. Bungum and S. Selstø, "What do quantum computing students need to know about quantum physics?," *Eur J Phys*, vol. 43, no. 5, p. 055706, Sep. 2022, doi: 10.1088/1361-6404/ac7e8a.
- [122]. E. Murina, "Math and Physics Tools for Quality Quantum Programming," in *Quality of Information and Communications Technology*, M. Shepperd, F. Brito e Abreu, A. Rodrigues da Silva, and R. Pérez-Castillo, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 263–273.
- [123]. P. Heron and L. McNeil, "Phys21: Preparing Physics Students for 21st-Century Careers. A report by the Joint Task Force on Undergraduate Physics Programs," Dec. 2016.
- [124]. P. J. Denning, "Computing is a Natural Science," *Commun. ACM*, vol. 50, no. 7, pp. 13–18, Jul. 2007, doi: 10.1145/1272516.1272529.
- [125]. D. E. Knuth, "Computer Science and Its Relation to Mathematics," *The American Mathematical Monthly*, vol. 81, no. 4, pp. 323–343, 1974, doi: 10.2307/2318994.
- [126]. P. J. Denning et al., "Computing as a discipline," *Computer (Long Beach Calif)*, vol. 22, no. 2, pp. 63–70, 1989, doi: 10.1109/2.19833.
- [127]. A. J. DuBrin, *Essentials of Management*, 9th ed. Mason, OH: South-Western Cengage Learning, 2012.
- [128]. M. F. J. Fox, B. M. Zwickl, and H. J. Lewandowski, "Preparing for the quantum revolution -- what is the role of higher education?," Jun. 2020, doi: 10.1103/PhysRevPhysEduRes.16.020131.
- [129]. M. M. Robles, "Executive Perceptions of the Top 10 Soft Skills Needed in Today's Workplace," *Business Communication Quarterly*, vol. 75, no. 4, pp. 453–465, Oct. 2012, doi: 10.1177/1080569912460400.
- [130]. C. D. Aiello et al., "Achieving a quantum smart workforce," *Quantum Sci Technol*, vol. 6, no. 3, p. 030501, Jul. 2021, doi: 10.1088/2058-9565/abfa64.
- [131]. QURECA Ltd, "A Review of Global Quantum Education Initiatives," Apr. 2022.
- [132]. M. N. Amin, R. P. Uhlig, P. P. Dey, B. Sinha, and S. Jawad, "The Needs and Challenges of Workforce Development in Quantum Computing," *American Society for Engineering Education*, 2019.

Информация об авторах / Information about authors

Рейес ХУАРЕС-РАМИРЕС получил степень PhD по информатике в Автономном университете Нижней Калифорнии (UABC) в 2008 году по специальности «Разработка

программного обеспечения». В настоящее время занимает должность полного профессора в UABC, кампус Тихуаны, Нижняя Калифорния (Мексика). Президент Мексиканского общества разработки программного обеспечения (REDMIS, <https://conisoft.org/redmis/>). Член Национальной системы исследователей Мексики (SNI), уровень 2, руководит несколькими исследовательскими проектами, как академическими, так и в сотрудничестве с промышленностью. Сфера научных интересов: программная инженерия (неопределенность в гибких методологиях, улучшение качества в Scrum), человеко-машинное взаимодействие (проектирование, ориентированное на пользователя, адаптивные пользовательские интерфейсы), с недавних пор работает в области квантовых вычислений. Главный председательствующий на некоторых национальных и международных мероприятиях, таких как Международная конференция по исследованиям и инновациям в области разработки программного обеспечения (CONISOFT).

Reyes JUÁREZ-RAMÍREZ received a PhD from the Universidad Autónoma de Baja California (UABC) in 2008, in Computer Science with a specialty in Software Engineering. He is currently holding a Full Professor position in UABC, Tijuana campus, Baja California, Mexico. He is the President of the Mexican Network of Software Engineering (REDMIS, <https://conisoft.org/redmis/>). He is a member of the National System of Researchers of Mexico (SNI), Level 2, and leads several research projects, academic and in collaboration with industry. His research areas are Software Engineering (uncertainty in agile methodologies, quality improvement in Scrum), Human-Computer Interaction (user-centered design, adaptive user interfaces), and recently he has started working with Quantum Computing. He is the general chair of some national and international events, such as the International Conference in Software Engineering Research and Innovation (CONISOFT).

Саманта ХИМЕНЕС имеет многолетний опыт преподавания компьютерных технологий, программирования и информатики для студентов бакалавриата. Принимала участие в качестве лидера в различных проектах по разработке программного обеспечения как исследовательского, так и прикладного характера. Получила степень PhD в области информатики в Автономном университете Нижней Калифорнии, степень магистра в области инженерии и степень бакалавра в области инженерии компьютерных систем в Университете Колимы, участвует в Национальной системе исследователей Мексики. Её научными интересами являются взаимодействие человека с компьютером, диалоговые системы, аффективные вычисления и образовательные системы. Она представляла работы на нескольких конференциях и опубликовала более 20 статей в международных научных журналах.

Samantha JIMÉNEZ has several years of experience teaching computer software engineering, programming, and computer science for bachelor's-level students. She has participated in a leadership role in various software development projects both for industry and academia. She holds a PhD in Computer Sciences from the Autonomous University of Baja California, a master's in engineering and a bachelor's degree in computer systems Engineering from the University of Colima. She is part of the National System of Researchers of Mexico. Her research interests are human-computer interaction, dialogue systems, affective computing, and educational systems. She has presented her work in several conferences and published more than 20 articles in international scientific journals.

Кристиан Ксавьер НАВАРРО-КОТА получил степень магистра по информатике в Центре научных исследований и высшего образования в Энсенаде в 2002 году и степень PhD в Университете Кастилии-Ла-Манча (Испания) в 2016 году. Работает на факультете инженерии, архитектуры и дизайна в Автономном университете Нижней Калифорнии (Мексика) с 2001 года, в настоящее время является профессором и исследователем. Его научные интересы сосредоточены в областях мобильных вычислений, взаимодействия человека и компьютера, повсеместных вычислений и машинного обучения.

Christian Xavier NAVARRO-COTA – received a Computer Science master’s degree from the Center of Scientific Research and Superior Education in Ensenada, in 2002, and a PhD degree from the University of Castilla–La Mancha, Spain, in 2016. He joined the Faculty of Engineering, Architecture and Design at the Universidad Autónoma de Baja California, Mexico, in 2001, where he is currently a Professor and Researcher. His research interests are focused on the fields of Mobile Computing, Human–Computer Interaction, Ubiquitous Computing, and M-learning.

Сезар ГУЕРРА-ГАРСИЯ – профессор кафедры вычислений Автономного университета Сан-Луис-Потоси (Мексика). Получил степень PhD в Университете Кастилии-Ла-Манча в 2011 году (Испания). Он получил свою первую степень в области компьютерных систем в 1996 году в Технологическом институте Сан-Луис-Потоси, Мехико. Имеет степень магистра информатики университета CICESE с 2000 года. Сфера научных интересов: разработка программного обеспечения, качество данных, разработка требований, разработка моделей, веб-инжиниринг и гражданская наука. Он имеет опыт преподавания более 20 лет в области разработки программного обеспечения и моделирования программного обеспечения.

César GUERRA-GARCÍA is currently Full Time Professor at Department of Computation, Autonomous University of San Luis Potosí, México. He obtained his PhD in University of Castilla-La Mancha in 2011, Spain. He did his First Degree in Computer Systems in 1996 in Technologic Institute of San Luis Potosí, México. He also obtained his Master of Computer Sciences at CICESE in 2000. His areas of interests are Software Engineering, Data Quality, Requirements Engineering, Model Driven Development, Web Engineering and Citizen Science. He has teaching experience of more than 20 years in the areas of Software Engineering and Software Modelling.

Эктор Херардо ПЕРЕС-ГОНСАЛЕС – профессор-исследователь Автономного университета Сан-Луис-Потоси (Мексика). Имеет степени магистра компьютерных наук (UNAM) и PhD по информатике (Университет Колорадо). Автор научно-исследовательских работ по автоматическому проектированию программного обеспечения и по квантовым вычислениям. Докладчик на конференциях (США, Бразилия, Канада, Англия, Испания, Португалия, Сингапур). Рецензент статей для международных журналов и конференций. Секретарь Мексиканского общества компьютерных наук, 2012-2014. Заведующий кафедрой информатики (Инженерная школа, УАСЛП). Лауреат всемирной стипендии Ли Кимче МакГрат 2014 года от Ассоциации научно-технических центров (ASTC). Член Национальной системы исследователей Мексики уровня I.

Hector Gerardo PEREZ-GONZALEZ is a research professor at the Autonomous University of San Luis Potosí. Master of Science in Computer Science (UNAM) and PhD in Computer Science (University of Colorado). Author of research papers on automatic software design and for quantum computers. Speaker at conferences (USA, Brazil, Canada, England, Spain, Portugal, and Singapore). Reviewer of papers for international journals and conferences. Secretary of the Mexican Society of Computer Science, 2012-2014. Head of the Computer Science department (Engineering school, UASLP). Recipient of the 2014 Lee Kimche McGrath Worldwide Fellowship from the Association of Science and Technology Centers (ASTC). Member of the National System of Researchers of Mexico Level I.

Карлос Альберто ФЕРНАНДЕС-И-ФЕРНАНДЕС имеет степень бакалавра по информатике Университета Веракруса, степень магистра информатики от Фонда Артуро Розенблюта и степень PhD Университета Шеффилда в области разработки программного обеспечения. Штатный профессор и научный сотрудник Института вычислительной техники в Технологическом университете Миштека, где он также является директором. Член Мексиканской академии вычислительной техники (AMEXCOMP), академическая секция “Программная инженерия”. Член Руководящего комитета Международного конгресса по исследованиям и инновациям в области разработки программного обеспечения (CONISOFT)

и Мексиканской сети разработки программного обеспечения (REDMIS). Член различных научных комитетов национальных и международных журналов и конференций. В области разработки программного обеспечения его основные направления включают как гибкие, так и традиционные методы разработки, визуальное моделирование и формальную спецификацию программного обеспечения.

Carlos Alberto FERNÁNDEZ-Y-FERNÁNDEZ holds a bachelor's degree in computer science from the Universidad Veracruzana, a master's degree in Computer Science from the Arturo Rosenblueth Foundation, and a PhD from the University of Sheffield in the field of Software Engineering. He is a full-time professor and researcher at the Institute of Computing in the Technological University of the Mixteca, where he also serves as the director. He is a member of the Mexican Academy of Computing (AMEXCOMP), in the Software Engineering academic section. He is a member of the Steering Committee of the International Congress on Research and Innovation in Software Engineering (CONISOFT) and the Mexican Network of Software Engineering (REDMIS). He is also a member of various scientific committees for national and international journals and conferences. Within the field of Software Engineering, his focus areas include both agile and traditional development methods, visual modeling, and formal software specification.

Хавьер ОРТИС-ЭРНАНДЕС имеет степень PhD по автоматизации и информатике, профессор кафедры программирования Национального центра исследований и технологических разработок (CENIDET) в Мексике. Научные интересы: Цифровая трансформация, разработка требований, моделирование бизнес-процессов.

Javier ORTIZ-HERNÁNDEZ – PhD in Automation and Computer Science, full professor at the Computer Science Department of the National Center of Research and Technological Development (CENIDET) in Mexico. Research interests: Digital transformation, requirements engineering, business process modeling.

Карина КАНСИНО – профессор по программной инженерии в Политехническом университете Тапачулы с большим опытом разработки приложений и управления моделями данных. Активный член Мексиканской сети разработки программного обеспечения (REDMIS) и Научного сообщества инженеров, работающих в прикладных областях. Она имеет признание Уровня I Национальной системы исследователей Мексики (SNI) области VIII, отличие в области Инженерного и технологического развития и звание почетного исследователя уровня VI Государственной системы исследователей штата Чьяпас. Ее основные направления исследований – моделирование баз знаний, применение описательных технологий для анализа данных и временные ряды.

Karina CANCINO is a full-time professor of Software Engineering at UPTapachula with extensive experience in application development and data model management. She is currently an active member of the Mexican Network of Software Engineering (REDMIS) and the Academic Body Engineering Applied to Organizations. She has the recognition Level I National System of Researchers of Mexico (SNI) Area VIII. Engineering and Technological Development and Honorary Researcher Level VI of the State System of Researchers of the State of Chiapas. Her main lines of research are knowledge base modeling, application of descriptive technologies for data analysis and time series.