|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | Медиацентр атомнойпромышленности[atommedia.online](https://atommedia.online/) | **Справочный материал**12.02.24 |

**Путеводитель по понятиям квантовой тематики**

1. ***Что такое квантовые технологии?***

Квантовые технологии — сравнительно молодое наукоемкое направление, основанное на явлениях квантовой физики, которое включено странами — технологическими лидерами в перечень технологий для обеспечения стратегической конкурентоспособности и безопасности.

1. ***Какие бывают квантовые технологии?***

Традиционно выделяют три квантовые технологии: квантовые вычисления, квантовые коммуникации и квантовую сенсорику (квантовые сенсоры).

1. ***Что такое квантовые вычисления?***

Квантовые вычисления — решение задач при помощи манипуляции квантовыми объектами: атомами, молекулами, фотонами, электронами и специально созданными макроструктурами. Их использование позволяет ученым достичь двух квантовых явлений — суперпозиции и запутанности. Благодаря этому исследователи могут синтезировать новые материалы, лекарства, а также моделировать сложные молекулы и решать оптимизационные задачи, недоступные сейчас для самых мощных компьютеров.

1. ***Что такое квантовый компьютер?***

Квантовые компьютеры — это новое поколение вычислительных устройств, в основе которых лежат эффекты квантовой физики. Такие устройства, использующие специализированные квантовые алгоритмы, способны на некоторых классах задач показать производительность, значительно превосходящую классические компьютеры, основанные на полупроводниковых технологиях.

1. ***За счет чего мощность квантового компьютера превосходит классические ПК и суперкомпьютеры?***

В классических вычислительных устройствах вся информация раскладывается на биты — 0 или 1, тогда как в квантовых наименьшей единицей информации является квантовый бит (кубит), способный одновременно находиться в обоих состояниях — и 0, и 1. Количество состояний, в которых находится квантовый процессор, быстро растет с увеличением числа кубитов за счет возможности связывать их между собой. Эта особенность позволяет квантовым устройствам решать различные вычислительные задачи на порядки быстрее классических компьютеров и суперкомпьютеров.

1. ***В России разрабатывают квантовые компьютеры?***

Россия позже других стран приступила к разработке квантовых технологий: по-настоящему активная работа с государственной поддержкой ведется лишь последние несколько лет. В 2019 году Правительство РФ разработало дорожную карту по развитию квантовых технологий, а позже приняло решение разбить ее на три отдельные дорожные карты: по развитию квантовых вычислений, квантовых коммуникаций и квантовых сенсоров.

В 2022 году проявил себя накопленный эффект совместных усилий государства, высокотехнологичных компаний, университетов и академических институтов в квантовой сфере. Еще несколько лет назад технологический разрыв с ведущими странами составлял 7–10 лет, а в настоящее время по ряду направлений Россия оказалась в числе лидеров и вошла в десятку государств с наиболее развитыми квантовыми технологиями. По некоторым направлениям, таким как технология квантовых процессоров на кудитах, Россия присутствует уже в топ-3, а ряд квантовых алгоритмов был разработан в нашей стране впервые в мире.

1. ***Кто возглавляет работу по строительству отечественных квантовых компьютеров?***

В России работа по созданию квантового компьютера ведется в рамках реализации правительственной дорожной карты развития высокотехнологичной области «Квантовые вычисления», координатором которой является Госкорпорация «Росатом». Основная цель дорожной карты заключается в построении отечественных квантовых компьютеров на четырех различных платформах, а также создании специализированного облачного софта. Для реализации данной задачи в 2021 году создана Национальная квантовая лаборатория, объединяющая высокотехнологичные компании, академические институты, университеты и стартапы.

1. ***Какие платформы обсуждаются в связке с квантовыми компьютерами?***

Квантовые компьютеры строятся на четырех основных платформах: сверхпроводящих цепочках, ионах, нейтральных атомах и фотонах. На самом деле платформ существует намного больше: еще есть интегральная оптика, квазичастицы (экситоны, поляритоны, магноны и др.), примесные атомы, полупроводниковые квантовые точки и центры окраски. Один компьютер может быть создан на базе нескольких платформ. Все они могут работать отдельно друг от друга.

1. ***На какие классы делятся квантовые вычислительные системы?***

Как классические компьютеры разделяются на процессоры общего назначения и интегральные схемы специального назначения, так и квантовые вычислительные системы разделяются на два основных класса — квантовые компьютеры и квантовые симуляторы.

1. ***Что надо знать о квантовых симуляторах?***

Квантовые симуляторы могут решать достаточно узкий круг задач за счет имитации качеств и функций реальных квантовых систем. Симуляторы можно назвать своеобразными предшественниками полноценных устройств, поскольку они позволяют в более управляемом режиме фиксировать их текущие несовершенства: например, повышать время жизни кубитов или работать над эффективностью алгоритмов для компенсации ошибок.

1. ***Часто можно услышать об универсальных квантовых компьютерах. А бывают какие-то еще?***

В работе над квантовым компьютером применяются несколько подходов. В первую очередь, это модель вентилей (цифровая), на основе которой строят так называемые универсальные квантовые компьютеры, способные реализовывать произвольные квантовые алгоритмы. Решение задачи на подобном устройстве выглядит следующим образом: исследователь берет исходное состояние квантовой системы, программирует к ней преобразования и считывает полученное состояние — оно и является ответом на заданный машине вопрос.

Еще одной популярной парадигмой являются адиабатические вычисления, основанные на одноименной теореме квантовой механики, сформулированной Максом Борном и Владимиром Фоком. Адиабатические компьютеры — вычислительные устройства на основе квантового отжига, способные решать исключительно задачи оптимизации, но в то же время куда более эффективно, чем это делают классические компьютеры или суперкомпьютеры. В 2020 году D-Wave Systems [представила](https://www.dwavesys.com/press-releases/d-wave-announces-general-availability-first-quantum-computer-built-business) подобную машину на 5000 кубит, но стоит помнить, что такие квантовые вычислители не являются квантовым компьютером в его привычном понимании.

Суть квантового отжига состоит в том, что при необходимой низкой температуре система всегда находится в своем обычном состоянии с минимальной энергией, это состояние называют основным. Такой уровень наименьшей энергии определяется [гамильтонианом](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%93%D0%B0%D0%BC%D0%B8%D0%BB%D1%8C%D1%82%D0%BE%D0%BD%D0%B8%D0%B0%D0%BD_%28%D0%BA%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D1%82%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%8F_%D0%BC%D0%B5%D1%85%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%BA%D0%B0%29), который задается видом исследуемой функции — ее минимум достигается с помощью перераспределения энергии между ближайшими кубитами, в процессе чего регистр релаксирует к состоянию термодинамического равновесия.  Изменившееся (эволюционировавшее) состояние системы считывается в качестве ответа.

1. ***Как измеряется качество квантового компьютера?***

Вычислительные возможности квантового компьютера определяются двумя основными характеристиками: количеством кубитов и их качеством (уровнем ошибок при совершении операций).

1. ***В чем заключаются основные сложности при создании квантовых компьютеров?***

Первая сложность — заставить кубиты стабильно сохранять когерентное состояние, то есть существовать и хранить информацию.

Вторая состоит в том, чтобы обеспечить слаженное функционирование как можно большего количества кубитов одновременно. Самые совершенные квантовые компьютеры сегодня содержат десятки и сотни кубитов, тогда как для революционного прорыва в производительности их потребуется на порядки больше — от тысяч до миллионов.

1. ***Что такое квантовые коммуникации?***

Коммуникация — набор технологий для передачи информации. В современном мире мы передаем информацию, кодируя ее в какие-либо физические сигналы: например, передавая данные в виде световых импульсов по оптоволоконному кабелю. В квантовых коммуникациях, в отличие от традиционных, в качестве носителя выступают не обычные световые импульсы достаточно большой мощности, а квантовые сигналы, то есть те, которые обладают существенной квантовой природой. Оказывается, что в ряде случаев они дают возможность решать совершенно недоступные ранее задачи.

Наиболее развитое направление в рамках технологии квантовых коммуникаций — квантовая криптография, или, более точно, квантовое распределение ключей. Это совокупность методов, направленных на выработку между удаленными пользователями общего секретного ключа, который в дальнейшем используется для шифрования.

Наряду с задачами квантовой криптографии (квантового распределения ключей) квантовые коммуникации включают в себя передачу квантовой информации между квантовыми компьютерами. Технологии плавно идут к развитию распределенных квантовых вычислений, то есть к созданию, например, центрального квантового компьютера и множества периферийных машин, которые решают часть подзадач и передают данные друг другу. Альтернативой этому может быть набор связанных между собой удаленных квантовых процессоров. В феврале 2021 года группа исследователей из Германии продемонстрировала возможность передачи квантовой информации между двумя модульными квантовыми процессорами. Результаты эксперимента [опубликовал](https://science.sciencemag.org/content/371/6529/614) журнал Science. Это важный шаг в развитии технологий, который показал, что увеличивать мощность квантовых вычислительных технологий возможно за счет объединения нескольких устройств в сеть.

1. ***Что такое квантовая криптография?***

Наиболее развитое направление в рамках технологии квантовых коммуникаций — квантовая криптография, или, более точно, квантовое распределение ключей. Это совокупность методов, направленных на выработку между удаленными пользователями общего секретного ключа, который в дальнейшем используется для шифрования.

1. ***Зачем нужна квантовая криптография?***

Квантовые технологии открывают доступ к сверхбыстрым вычислениям — и они манят не только ученых, но и злоумышленников. И хотя пока что не существует квантовых компьютеров, достаточно мощных для массового взлома криптографических систем, все указывает на то, что они появятся в ближайшем будущем. Квантовая криптография обеспечивает защиту от атак с применением квантовых компьютеров.

1. ***Как работает квантовая криптография?***

До того, как обмениваться зашифрованной информацией, отправитель сообщения передает получателю ключ — набор случайных чисел, необходимых для дальнейшей расшифровки сообщения. Этот ключ распределяется по оптоволоконному кабелю частицами света — фотонами. Если злоумышленник каким-либо образом перехватит ключ, получатель сообщения об этом узнает — на это укажет уровень ошибок в системе. Создать точную копию фотона для замены перехваченного тоже не получится — это гарантируют фундаментальные законы физики (в том числе теорема о запрете клонирования). Таким образом, можно гарантировать, что ключ, а значит и доступ к секретной информации, имеется лишь у легитимных — законных — пользователей.

1. ***Как передается квантовая информация?***

Интересная технологическая особенность состоит в том, что если в квантовых компьютерах мы выбираем платформу, которая наиболее эффективно подойдет для решения тех или иных задач, то с обменом квантовой информацией все очевидно: лучше всего справляются фотоны, то есть частицы света. Поэтому исследователи уже осознают, какой будет элементная база.

1. ***Что такое квантовые сенсоры?***

Квантовые сенсоры — высокоточные измерительные приборы, работа которых построена на эффектах квантовой механики. Они отличаются крайне высокой чувствительностью, благодаря чему способны делать измерения, недоступные классическим датчикам.

1. ***Где применяются квантовые сенсоры?***

Такие устройства используются в автомобилестроении, здравоохранении, промышленности, геологии, транспортной отрасли, компьютерной разработке и многих других сферах. Но по-настоящему бесценный вклад квантовая сенсорика может привнести в медицину. Благодаря своей чувствительности датчики способны зафиксировать первые сигналы заболевания еще до того, как их можно будет «поймать» другими методами диагностики. А выявление болезни на ранней стадии — один из главных факторов успешного лечения.

1. ***Как квантовые сенсоры применяются в медицине?***

Одно из основных направлений применения квантовых сенсоров в медицине — магнитоэнцефалография. Эта процедура позволяет изучать состояние мозга через измерение магнитных полей, которые возникают в ходе его электрической активности.

Большинство современных методов диагностики заболеваний мозга фиксируют не магнитные, а электрические компоненты, например по этому принципу работает электроэнцефалография. Но эта процедура не дает полной информации: датчикам приходится ловить сигнал сквозь череп и ткани, а тело человека — плохой проводник электрических полей.

С магнитными полями все по-другому: магнитный сигнал из участка мозга проходит сквозь ткани в неизменном состоянии, так что мы можем получить от него больший объем данных. Сложность в том, что магнитные поля нашего мозга тяжело уловить, поскольку их мощность крайне мала: в 10 млрд раз меньше, чем у Земли. Для этого нужны очень чувствительные приборы — такие, как квантовые сенсоры. Фиксируя эти маленькие магнитные поля, сенсоры дают возможность диагностировать различные мозговые опухоли, синдром Альцгеймера или эпилепсию.

1. ***В России тоже имеются подобные разработки?***

Квантовые сенсоры для сверхчувствительного магнитоэнцефалографа уже существуют, а в 2021 году команда QLU с учеными из Сколтеха и НИУ ВШЭ разработала их новый тип — первый в мире твердотельный сверхчувствительный магнитометр, который может работать при комнатной температуре. Сейчас в России создается первый прототип сверхчувствительного магнитоэнцефалографа.