

DOI 10.33930/ed.2019.5007.35(7)-6  
УДК 373.5.016:[004.4+530.145]

## ОСНОВИ КВАНТОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ У ЗАКЛАДАХ ЗАГАЛЬНОЇ СЕРЕДНЬОЇ ОСВІТИ: ОБУМОВЛЕНІСТЬ ТА ЗАБЕЗПЕЧЕНІСТЬ

*THE BASICS OF QUANTUM TECHNOLOGIES IN GENERAL  
SECONDARY EDUCATION INSTITUTIONS: CONDITIONALITY AND  
PROVISION*

Л. В. Легка

**Актуальність теми дослідження.** Актуальність роботи визначається необхідністю вивчення в закладах загальної середньої освіти основ квантової інформатики як перспективного технологічного напрямку, що визначається одним з пріоритетних у багатьох країнах.

Ідеться про управління квантовими комп'ютерами, що у майбутньому зможуть значно пришвидшити виконання алгоритмів для розв'язання складних задач оптимізації, моделювання, криптографії тощо.

**Постановка проблеми.** Значущими складовими мети освіти є всебічний розвиток людини, формування цінностей і компетентностей, необхідних для її успішної самореалізації. Це зумовлює випереджальний і інноваційний характер освіти та необхідність її модернізації на основі системного, методично обґрунтованого упровадження основ квантової інформатики у інформатичну освітню галузь.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У той час коли розвиток класичних комп'ютерів не припиняється, темпи розвитку квантових технологій набирають обертів, а квантові комп'ютери, що ні в якому разі не усунуть класичні, є реальністю.

У багатьох державах світу (США, Китай, країни Євросоюзу та ін.) розвиток квантових технологій підтримується законодавчо та фінансово.

**Постановка завдання.** Мета дослідження – проаналізувати перспективи, можливості та

**Urgency of the research** is determined by the need to study the basics of quantum informatics in general secondary education institutions as a promising technological direction, defined as one of the priorities in many countries.

It is about controlling quantum computers, which in the future will be able to significantly speed up the execution of algorithms to solve complex optimization, simulation, cryptography and similar problems.

**Target setting.** Significant components of the goal of education are all-around human development, formation of values and competencies necessary for its successful self-realization. This leads to the advanced and innovative nature of education and the necessity of its modernization on the basis of the systematic, methodologically grounded introduction of quantum informatics foundations into the informatics education sector.

**Actual scientific researches and issues analysis.** While the development of classical computers continues unabated, the pace of quantum technology is gaining momentum and quantum computers will by no means eliminate classical computers, is a reality.

In many countries around the world (USA, China, EU countries, etc.) the development of quantum technologies are supported legislatively and financially.

**The research objective** is to analyse the prospects, opportunities and readiness of studying quantum

готовність вивчення квантової інформатики в закладах загальної середньої освіти.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

1. Узагальнити та систематизувати відомості щодо підготовки фахівців квантової галузі на рівні вищої освіти.

2. Обґрунтувати перспективи та окреслити можливості вивчення основ квантової інформатики старшокласниками.

#### **Виклад основного матеріалу.**

Систематизовано відомості про навчальні програми дисциплін квантово орієнтованого змісту та підготовку фахівців квантової галузі на різних рівнях вищої освіти у закладах України. Обґрунтовується необхідність пропедевтичного навчання квантових технологій у закладах загальної середньої освіти. Наводяться приклади світової та української практик популяризації квантових технологій серед учнів старшого шкільного віку.

**Висновки.** 1. Перелік навчальних дисциплін квантово-орієнтованого змісту, а також підготовка фахівців квантової галузі на різних рівнях вищої освіти з кожним навчальним роком набуває поширення, у тому числі й в Україні (починаючи з 2017).

2. Враховуючи перспективи використання квантових технологій, світовий та український досвід їх популяризації на різні аудиторії (серед фахівців, майбутніх фахівців, учнів), попит на спеціалістів квантової галузі, пропонуємо організувати систематизоване навчання основ квантових технологій учнів старшого шкільного віку.

**Ключові слова:** квантовий комп'ютер, квантові технології, пропедевтичне навчання квантової інформатики, IBM Quantum.

informatics in general secondary education institutions.

In order to achieve the goal, the following tasks were set:

1. to generalize and systematize information about training of quantum experts at the level of higher education.

2. to substantiate perspectives and outline possibilities of study of quantum informatics basics by high school students.

#### **The statement of basic materials.**

Information about curricula of quantum-oriented content disciplines and training of quantum specialists at different levels of higher education in Ukrainian institutions is systematized. The necessity of propaedeutics of quantum technologies training in institutions of general secondary education is substantiated. Examples of the world and Ukrainian practices of popularization of quantum technologies among students of high school age are given.

**Conclusions.** 1. The list of educational disciplines of quantum-oriented content, as well as the training of quantum specialists at different levels of higher education, is becoming widespread every academic year, including in Ukraine (starting from 2017).

2. Taking into consideration prospects of quantum technologies use, world and Ukrainian experience of their popularization for different audiences (among specialists, future specialists, students), demand for specialists in the quantum field, we propose to organize systematized teaching of quantum technologies basics to senior school-age students.

**Keywords:** quantum computer, quantum simulator, propaedeutic teaching of quantum computer science, IBM Quantum.

**Актуальність теми дослідження.** Зміни апаратного забезпечення обчислювальних систем, пов'язані із поширенням квантових інформаційних технологій, справляють революційний вплив на:

– програмування: виникає потреба застосування нового класу

алгоритмів – квантових, переходу від бітів то кубітів, від детермінованого до ймовірнісного виконання програм тощо;

– роботу з великими даними: квантові алгоритми надають можливість зниження обчислювальної складності та, як результат, радикального прискорення дій з їх опрацювання;

– розв’язання задач штучного інтелекту: квантові та квантово покращені алгоритми машинного навчання надають можливість зниження обчислювальної складності при опрацюванні даних ймовірнісної природи;

– інформаційну безпеку: алгоритми квантової криптографії та відповідні канали передавання даних створюють умови для переходу до нового рівня захищеності та забезпечення конфіденційності.

Квантові інформаційні технології суттєво впливають на зв’язки інформатичної освітньої галузі із ключовими компетентностями – не лише інформаційно-комунікаційної, а й:

– математичної – поглиблюється роль методів та моделей теорії ймовірностей та математичної статистики для розв’язання задач засобами квантових цифрових технологій;

– у галузі природничих наук, техніки і технологій – виникає потреба у проведенні навчальних досліджень та експериментів природничо-технологічного змісту за допомогою квантових цифрових технологій, а також визначення загальних фізичних принципів їх будови і функціонування;

– інноваційності – виникає потреба у формуванні готовності розпізнавати та описувати поширення квантових цифрових інновацій у науці і суспільстві, інтегрувати знання із різних предметних галузей;

– соціальних – створюються умови для переходу на новий рівень захисту себе і цифрові пристроїв від типових кіберзагроз та ін.

**Постановка проблеми.** Сучасна школа повинна надавати знання, актуальні не лише сьогодні, а й на далеку перспективу. Значущими складовими мети освіти є всебічний розвиток людини, її інтелектуальних та творчих здібностей, формування цінностей і компетентностей, необхідних для її успішної самореалізації, підвищення освітнього рівня громадян задля забезпечення сталого розвитку держави. Це зумовлює випереджальний і інноваційний характер освіти та необхідність її модернізації на основі системного, методично обґрунтованого упровадження основ квантової інформатики у інформатичну освітню галузь.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У серпні 2020 року консалтингова компанія Gartner опублікувала чергову версію своєї кривої розвитку (Hype Cycle) передових технологій [6], що суттєво вплинуть на суспільство та бізнес упродовж наступних п’яти-десяти років. На основі розгляду 1700 провідних технологій К. Панетта (K. Panetta) було виокремлено 5 нових тенденцій їх розвитку: composite architectures (“складені/композиційні архітектури”); algorithmic trust (“алгоритмічна довіра”); beyond silicon (“окрім кремнію”); formative AI (“формуючий штучний інтелект”); digital me (“цифровий Я”).

В описі тенденції Beyond silicon наголошується про те, що закон Мура вичерпав себе, адже створити транзистор розміром менше 1 нм практично неможливо. При виробництві мають місце складнощі технічного характеру і тому є сенс розвивати некремнієві технології – транзистори на основі вуглецю і квантове обладнання, зокрема квантові комп’ютери

У той час коли розвиток класичних комп'ютерів не припиняється (процесори стали багатоядерними, з'явилися співпроцесори для вирішення задач опрацювання фото, кодування відео тощо), темпи розвитку квантових технологій набирають обертів, а квантові комп'ютери є реальністю. Слід розуміти, що квантові комп'ютери ні в якому разі не усунуть класичні, однак стануть незамінними для певного типу задач, розв'язання яких базується на вже відомих квантових алгоритмах – задачі визначення збалансованості функції (алгоритми Дойча-Йози (Deutsch-Jozsa), Бернштейна-Вазірані (Bernstein-Vazirani)), тотожності функцій (алгоритм Саймона (Simon's algorithm)), гармонійного аналізу (квантове перетворення Фур'є (Quantum Fourier Transform)), криптоаналізу (алгоритми Гровера (Grover's Algorithm) та Шора (Shor's Algorithm)), квантової телепортації (алгоритм квантової телепортації (Quantum Teleportation)) та нових (поки що експериментальних

У багатьох державах світу розвиток квантових технологій підтримується законодавчо та фінансово.

У США штучний інтелект і квантові технології зазначені як два стратегічно важливих напрями для економічного зростання та національної безпеки держави. У 2018 році уряд США ухвалив закон про Національну квантову ініціативу (National Quantum Initiative), мета якого забезпечити збереження позицій світового лідера в галузі квантової інформатики та її технологічних застосуваннях. Сума фінансування діяльності у межах Національної квантової ініціативи на перші п'ять років становить 1,2 мільярдів доларів [1]. Окремі комерційні дослідження здійснюється за фінансування компаній IBM, Microsoft, Google, Intel та ін.

Так, IBM співпрацює більш як із 140 компаніями з використання квантових технологій, наприклад: з JSR Corporation, Mitsubishi Chemical та Keio University досліджують нові форми світла за допомогою квантових обчислень; з Mercedes-Benz досліджують майбутнє електромобілів; з ExxonMobil вирішують складні енергетичні проблеми [5].

Лідерські позиції в технологічному розвитку, зокрема квантових технологіях, виборює Китай. У 2016 році китайським урядом ухвалено Національний план науково-технічних інновацій до 2030 (режим доступу: [http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-08/08/content\\_5098072.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-08/08/content_5098072.htm)), а у 2017 році розпочато будівництво Національної лабораторії квантової інформатики з початковим фінансуванням 7 мільярдів юанів. Китайський технічний гігант Alibaba (режим доступу: <https://damo.alibaba.com/labs/quantum>) здійснює значні інвестиції у власні квантові ініціативи, зокрема запуск сервісу квантових обчислень через хмарну платформу.

У країнах Євросоюзу:

– з 2018 року почала діяти дослідницька програма The Quantum Technologies Flagship (режим доступу: <https://qt.eu/>) на підтримку фундаментальних квантових досліджень з мінімальним терміном дії 10 років з очікуваним бюджетом 1 мільярд євро;

– у червні 2019 року 24 держави взяли участь у підписанні декларації задля дослідження, розвитку та розгортання квантової комунікаційної інфраструктури (quantum communication infrastructure – QCI) для захисту від кіберзагроз [4];

– у травні 2021 року консорціумом QTEdu опубліковано першу версію

Європейської системи компетенцій у галузі квантових технологій (European Competence Framework for Quantum Technologies) [7].

За аналітичними даними Національного інституту стратегічних досліджень (станом на 20 жовтня 2020 року) “Україна перебуває на узбіччі” розвитку проривних технологій, зокрема квантових [16], що може бути пов’язане, по-перше, із недостатнім держбюджетним фінансуванням наукових досліджень у цілому, по-друге, із “суттєвою невідповідністю професійно-кваліфікаційної робочої сили потребам ринку”.

**Постановка завдання.** Мета дослідження – проаналізувати перспективи, можливості та готовність вивчення квантової інформатики в закладах загальної середньої освіти.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

1. Узагальнити та систематизувати відомості щодо підготовки фахівців квантової галузі на рівні вищої освіти.

2. Обґрунтувати перспективи та окреслити можливості вивчення основ квантової інформатики старшокласниками.

**Виклад основного матеріалу.**

Розвиток квантових обчислень, удосконалення квантового обладнання вказують на те, що кожен керівник бізнес-організації повинен мати базове уявлення про те, як працюють квантові технології, які проблеми вони можуть допомогти вирішити, і як слід підготуватися до того, щоб використовувати їх потенціал.

Уже сьогодні, за даними міжнародного сайту з безкоштовного пошуку вакантних робочих місць Indeed (режим доступу: <https://www.indeed.com/>), від початку липня 2021 року, пропонується 2337 вакансій з критерієм відбору квантові обчислення (“quantum computing”), 1368 – інженер з квантового програмного забезпечення (“quantum software engineer”) та 51 – квантовий програміст (“quantum programmer”). На сайті з розміщення вакансій та пошуку роботи ZipRecruiter ([ziprecruiter.com](http://ziprecruiter.com)) у липні 2021 року було 156 пропозицій для тих, хто хотів би працювати інженером з квантового програмного забезпечення у провідних компаніях США.

Збільшення попиту світового ринку праці на квантово грамотних фахівців призвів до відкриття в закладах вищої освіти, у тому числі й України, нових квантово орієнтованих освітніх програм у галузі 10 – Природничі науки, спеціальність: 104 – Фізика та астрономія (табл. 1), а також поширення дисциплін (курсів) відповідного змісту (табл. 2).

**Таблиця 1**  
**Квантово орієнтовані освітні програми в ЗВО України**

Заклад вищої освіти	Назва освітньої програми	Рік затвердження
Перший (бакалаврський) рівень вищої освіти		
Львівський національний університет імені Івана Франка	“Квантові комп’ютери та квантове програмування” [13]	2020
Другий (магістерський) рівень вищої освіти		
Київський національний університет імені Тараса Шевченка	“Квантові комп’ютери, обчислення, інформація” [18]	2018

Львівський національний університет імені Івана Франка	“Квантові комп’ютери та квантове програмування” [21]	2021
--	--	------

Таблиця 2

Приклади навчальних програм дисциплін квантово орієнтованого змісту (за матеріалами офіційних сайтів ЗВО України)

Заклад вищої освіти	Спеціальність	Назва дисципліни	Рік затвердження
Перший (бакалаврський) рівень вищої освіти			
Одеський національний університет імені І. І. Мечнікова	113 – Прикладна математика	“Математичні основи квантового комп’ютерингу” [10]	2020
Сумський державний університет	171 – Електроніка	“Квантові технології в комп’ютерній техніці” [19]	2020
Другий (магістерський) рівень вищої освіти			
Львівський національний університет імені Івана Франка	122 – Комп’ютерні науки та інформаційні технології	“Квантові комп’ютери та квантові обчислення” [9]	2016
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна	104 – Фізика та астрономія	“Сучасні проблеми фізики: квантовий комп’ютер” [15]	2017
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна	125 – Кібербезпека (Безпека інформаційних та комунікаційних систем)	“Квантові обчислення і криптографія” [17]	2018
Криворізький державний педагогічний університет	014 – Середня освіта (Інформатика)	“Квантове програмування” [20]	2020
Одеський національний університет імені І. І. Мечнікова	104 – Фізика та астрономія	“Квантова інформатика” [8]	2020

Беручи до уваги попит на фахівців квантової галузі, а також появу окремих квантово орієнтованих освітніх програм, за якими здійснюється відповідна фахова підготовка, зростання кількості дисциплін квантово орієнтованого змісту в освітніх програмах інших спеціальностей, особливого значення набуває пропедевтичне навчання квантових технологій старшокласників.

Сьогодні учні старшої школи, а також усі охочі опанувати квантову інформатику можуть скористатися відкритими Інтернет-ресурсами – квантовими симуляторами, квантовими комп’ютерами із хмарним

доступом та відповідними навчальними матеріалами від провідних ІТ-компаній.

IBM Quantum надає доступ до електронного підручника з квантових обчислень, можливість виконувати на квантових симуляторах квантові алгоритми, побудовані у вигляді схем, за допомогою сервісу IBM Quantum Composer, а за умови нескладної реєстрації – ще й на квантових комп'ютерах IBM Quantum Experience; у IBM Quantum Lab реалізовувати квантові алгоритми мовою квантового асемблера QASM або мовою Python з використанням бібліотеки Qiskit (режим доступу: <https://quantum-computing.ibm.com/>).

Microsoft пропонує безкоштовно скористатися документацію та пакетом засобів реалізації квантових алгоритмів Quantum Development Kit (QDK) мовою квантового програмування Q#. QDK містить всі засоби, необхідні для створення власних квантових програм та експериментів на Q#. Програма “Quantum computing foundations” від Microsoft (режим доступу: <https://docs.microsoft.com/en-us/learn/paths/quantum-computing-fundamentals/>) позиціонується як курс для початківців.

D-Wave надає вільний он-лайн доступ до підручника про квантові обчислення, який, за твердженням авторів, доступний для розуміння як аудиторії з технічною, так і нетехнічною освітою. Разом з тим зазначається, що не будуть зайвими, проте обов'язково не вимагаються, первинні (елементарні) знання з квантової фізики, лінійної алгебри, теорії комплексних чисел та основ програмування [3].

У світовій практиці набувають поширення онлайн-школи, майстер-класи, літні табори для підлітків із вивчення квантових технологій. Так, наприкінці 2020 року для учнів старшої школи стартував спільний проєкт The Coding School та IBM Quantum “Вступ до квантових обчислень” (Introduction to Quantum Computing). Організатори переконані, що знання у квантовій галузі мають великі перспективи для професійної діяльності в соціальних і гуманітарних науках, медицині, біології й хімії, економіці, фінансах і логістиці, промисловості та сільському господарстві, політиці й інших галузях. Усіх зареєстрованих учасників проєкту було забезпечено якісним безкоштовним доступом до теоретичних відомостей та надано можливість поринути у світ квантових обчислень, незалежно від того чи планують вони в майбутньому займатися квантовими технологіями [2].

Перевагами наведених ресурсів є відкритий доступ до теорії, можливість набути практичні уміння будувати та реалізовувати квантові алгоритми як самостійно, так і під керівництвом викладача. Проте на даний момент суттєвим недоліком зазначених ресурсів щодо їх безпосереднього використання для навчання учнів ліцеїв вважаємо відсутність навчальних матеріалів українською.

Науково-популярні ресурси про квантові технології для учнів України пропонує Х. П. Гнатенко. За даними електронними матеріалами (після оплати) учні мають змогу ознайомитися з фундаментальними поняттями квантової механіки – квантова перевага, квантовий біт, квантовий паралелізм, квантове вимірювання, квантова заплутаність, квантова суперпозиція, тунелювання, квантова телепортація, а також з прикладами базових задач квантової криптографії. Враховуючи перспективи квантового моделювання складних систем різної природи (зокрема, криптографічних, хімічних та економічних), ми вважаємо за

доцільне та можливе систематизувати та адаптувати основи квантової інформатики для оволодіння учнями ліцеїв [11; 12].

Одеський Рішельєвський ліцей у рамках власного проєкту “Науковий лекторій” спільно з Одеським національним університетом імені І. І. Мечнікова пропонує цикл відеолекцій “Нанoeлектроніка: наука і сучасність” та “Квантова механіка” (режим доступу: [https://www.youtube.com/channel/UCy\\_RigQxVvMhIQco-ZCAYww](https://www.youtube.com/channel/UCy_RigQxVvMhIQco-ZCAYww)).

Досвід світової та української практик популяризації квантових технологій серед учнів старшого шкільного віку є переконливим свідченням можливості засвоєння ними основ квантових технологій за адаптованими для сприйняття відповідною аудиторією матеріалами. Наприклад:

- у межах нового вибіркового модуля “Основи квантової інформатики” програми з інформатики рівня стандарту;
- за рахунок наскрізного вивчення основ квантової інформатики в курсах фізики, математики та інформатики;
- у межах інтегрованого курсу за вибором “Основи квантової інформатики” для класів інформаційно-технологічного, фізичного, математичного, фізико-математичного профілів [14].

#### **Висновки.**

1. Систематичне навчання квантової інформатики у ЗВО відбувається насамперед на II та III рівнях вищої освіти. В Україні всі освітні програми з квантової інформатики започатковані у межах спеціальності 104 – Фізика та астрономія, у той час як у світі підготовка відповідних фахівців відбувається як за освітніми програмами з фізики, так й з інформатики, а також за міждисциплінарними програмами (починаючи з 2017).

2. Враховуючи перспективи використання квантових технологій, світовий та український досвід їх популяризації на різних аудиторіях (серед фахівців, майбутніх фахівців, учнів), попит на спеціалістів квантової галузі, пропонуємо організувати систематизоване навчання основ квантових технологій учнів старшого шкільного віку.

#### **Список використаних джерел**

1. Congress.gov. Text - H.R.6227 - 115th Congress (2017-2018): National Quantum Initiative Act. Decemder 21, 2018. Available from: <<https://www.congress.gov/bill/115th-congress/house-bill/6227/text>>. [21 July 2021].
2. Durst, L, Asfaw, A & Peltz, K 2020. *IBM and The Coding School to offer free online quantum computing course for 5,000 students*. Available from: <<https://www.ibm.com/blogs/research/2020/10/quantum-coding-school/>>. [21 July 2021].
3. D-Wave 2021. *Quantum Computing Primer*. Available from: <<https://www.dwavesys.com/tutorials/background-reading-series/quantum-computing-primer>>. [21 July 2021].
4. European Commition 2021. *Austria, Bulgaria, Denmark and Romania join initiative to explore quantum communication for Europe*. Available from: <<https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/news/austria-bulgaria-denmark-and-romania-join-initiative-explore-quantum-communication-europe>>. [21 July 2021].
5. IBM 2021. *Quantum for Business*. Available from: <<https://www.ibm.com/quantum-computing/business/>>. [21 July 2021].
6. Panetta, K 2020. *The Gartner Hype Cycle for Emerging Technologies, 2020 highlights 30 technology profiles that will significantly change society and business over the next five to ten years..* Available from:

- <<https://www.gartner.com/smarterwithgartner/5-trends-drive-the-gartner-hype-cycle-for-emerging-technologies-2020/>>. [21 July 2021].
7. QTEdu consortium 2021. *Competence Framework for Quantum Technologies Version 1.0*. Available from: <[https://qt.eu/app/uploads/2019/02/Competence\\_Framework\\_for\\_QT\\_1.0\\_May\\_2021.pdf](https://qt.eu/app/uploads/2019/02/Competence_Framework_for_QT_1.0_May_2021.pdf)>. [21 July 2021].
  8. Адамян, ВМ & Завальнюк, ВВ 2020. *Квантова інформатика. Робоча програма навчальної дисципліни*. Одеський національний університет імені І. І. Мечнікова, Одеса. Доступно: <[http://phys.onu.edu.ua/pub/Робочі\\_програми/Квантова\\_інформатика\\_2020.pdf](http://phys.onu.edu.ua/pub/Робочі_програми/Квантова_інформатика_2020.pdf)>. [21 липня 2021].
  9. Болеста, ІМ 2016. *Квантові комп'ютери та квантові обчислення. Програма вивчення навчальної дисципліни*. Львівський національний університет імені Івана Франка, Львів. Доступно: <[https://electronics.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/Prog\\_KKKO-.pdf](https://electronics.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/Prog_KKKO-.pdf)>. [21 липня 2021].
  10. Глушков, ОВ, Хецеліус, ОЮ, Свиначенко, АА & Буяджи, ВВ 2020. *Математичні основи квантового комп'ютингу. Силабус навчальної дисципліни*, Одеський державний екологічний університет, Одеса. Доступно: <<http://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint/7710/>>. [21 липня 2021].
  11. Гнатенко, Х 2020. 'Квантові комп'ютери: сьогодні та майбутнє', *Колосок*, № 5, с. 2-7. Доступно: <<https://e-kolosok.org/khrystyna-hnatenko-neymovirne-u-kvantovomu-sviti/>>. [21 липня 2021].
  12. Гнатенко, Х. 2020. 'Неймовірне у квантовому світі', *Колосок*, № 4, с. 2-7. Доступно: <<https://e-kolosok.org/khrystyna-hnatenko-neymovirne-u-kvantovomu-sviti/>>. [21 липня 2021].
  13. Гнатенко, ХП, Ткачук, ВМ, Чорнодольський, ЯМ & Самар, МІ 2020. *Квантові комп'ютери та квантове програмування. Освітньо-професійна програма*. Львівський національний університет імені Івана Франка, Львів. Доступно: <[https://physics.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/OP\\_bak\\_kvant\\_comp\\_2020.pdf](https://physics.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/OP_bak_kvant_comp_2020.pdf)>. [21 липня 2021].
  14. Легка, Л, Шокалюк, С & Богуненко, Є 2021. 'Пропедевтика вивчення квантової інформатики у профільній (старшій) школі', *Фізико-математична освіта*, 28(2), 51–56. doi: 10.31110/2413-1571-2021-028-2-009. [21 липня 2021].
  15. Майзеліс, ЗО 2017. *Сучасні проблеми фізики: квантовий комп'ютер. Робоча програма навчальної дисципліни*, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків. Доступно: <[http://kaf-theor-phys.univer.kharkov.ua/Robochi%20programy/Rob\\_pr\\_navch\\_dysc\\_2017-2018/Zag\\_kursy\\_PDFs%20for%20Site/Kvantovyy\\_komputer\\_2017-18\\_osv\\_nauk\\_prof.pdf](http://kaf-theor-phys.univer.kharkov.ua/Robochi%20programy/Rob_pr_navch_dysc_2017-2018/Zag_kursy_PDFs%20for%20Site/Kvantovyy_komputer_2017-18_osv_nauk_prof.pdf)>. [21 липня 2021].
  16. *Національний інститут стратегічних досліджень* 2020. Аналітична доповідь до щорічного Послання Президента України до Верховної Ради України "Про внутрішнє та зовнішнє становище України", Київ. Доступно: <<https://niss.gov.ua/publikacii/poslannya-prezidenta-ukraini/analitichna-dopovid-do-schorichnogo-poslannya-prezidenta-4>>. [21 липня 2021].
  17. Носов, ВВ 2018. *Квантові обчислення і криптографія. Програма навчальної дисципліни*, Харківський національний університет внутрішніх справ, Харків. Доступно: <<https://lib.univd.edu.ua/?action=predmet&id=107639>>. [21 липня 2021].
  18. Пінкевич, ІП, Дмитрук, ІМ, Єщенко, ОА & Кравченко, ВМ 2018. *Квантові комп'ютери, обчислення, інформація. Освітньо-наукова програма на здобуття освітнього степеню Магістр, за спеціальністю "104 Фізика та астрономія"*, Київський національний університет імені Т. Г. Шевченка, Київ. Доступно: <[https://www.phys.univ.kiev.ua/wp-content/uploads/2021/05/onp\\_magistry\\_kvant\\_komp\\_obch\\_inf\\_last\\_03\\_12\\_2018.pdf](https://www.phys.univ.kiev.ua/wp-content/uploads/2021/05/onp_magistry_kvant_komp_obch_inf_last_03_12_2018.pdf)>. [21 липня 2021].

19. Пономарьов, ОГ 2020. *Квантові технології в комп'ютерній техніці. Силабус навчальної дисципліни*, Сумський державний університет, Суми. Доступно: <[https://ekt.elit.sumdu.edu.ua/images/PDF\\_documents/CLBS/3.pdf](https://ekt.elit.sumdu.edu.ua/images/PDF_documents/CLBS/3.pdf)>. [21 липня 2021>.
20. Семеріков, СО 2020. *Квантове програмування. Силабус навчальної дисципліни*, Криворізький державний педагогічний університет. Доступно: <<https://drive.google.com/file/d/1A2GxCYPl7bnKTUoUuPMFETXVqzHkiSVN/view>>. [21 липня 2021>.
21. Ткачук, ВМ, Гнатенко, ХП, Чорнодольський, ЯМ & Самар, МІ 2021. *Квантові комп'ютери та квантове програмування. Освітньо-наукова програма*, Львівський національний університет імені Івана Франка, Львів. Доступно: <[https://physics.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/OP\\_mag\\_kvant\\_comp\\_1.9\\_2021.pdf](https://physics.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/OP_mag_kvant_comp_1.9_2021.pdf)>. [21 липня 2021>.

### References

1. Congress.gov. Text - H.R.6227 - 115th Congress (2017-2018): National Quantum Initiative Act. Decemder 21, 2018. Available from: <<https://www.congress.gov/bill/115th-congress/house-bill/6227/text>>. [21 July 2021].
2. Durst, L, Asfaw, A & Peltz, K 2020. *IBM and The Coding School to offer free online quantum computing course for 5,000 students*. Available from: <<https://www.ibm.com/blogs/research/2020/10/quantum-coding-school/>>. [21 July 2021].
3. D-Wave 2021. *Quantum Computing Primer*. Available from: <<https://www.dwavesys.com/tutorials/background-reading-series/quantum-computing-primer>>. [21, July 2021].
4. European Commission 2021. *Austria, Bulgaria, Denmark and Romania join initiative to explore quantum communication for Europe*. Available from: <<https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/news/austria-bulgaria-denmark-and-romania-join-initiative-explore-quantum-communication-europe>>. [21, July 2021].
5. IBM 2021. *Quantum for Business*. Available at: <<https://www.ibm.com/quantum-computing/business/>>. [21 July 2021>.
6. Panetta, K 2020. *The Gartner Hype Cycle for Emerging Technologies, 2020 highlights 30 technology profiles that will significantly change society and business over the next five to ten years*. Available at: <<https://www.gartner.com/smarterwithgartner/5-trends-drive-the-gartner-hype-cycle-for-emerging-technologies-2020/>>. [21 July 2021].
7. QTEdu consortium 2021. *Competence Framework for Quantum Technologies Version 1.0*. Available from: <[https://qt.eu/app/uploads/2019/02/Competence\\_Framework\\_for\\_QT\\_1.0\\_May\\_2021.pdf](https://qt.eu/app/uploads/2019/02/Competence_Framework_for_QT_1.0_May_2021.pdf)>. [21 July 2021].
8. Adamyan, VM & Zaval'nyuk, VV 2020. *Kvantova informatyka. Robocha prohrama navchal'noyi dystsypliny (Quantum computer science. Working program of the discipline)*, Odeskyy natsionalnyy universytet imeni I. I. Mechnikova, Odesa. Dostupno: <[http://phys.onu.edu.ua/pub/Робочі\\_програми/Квантова\\_інформатика\\_2020.pdf](http://phys.onu.edu.ua/pub/Робочі_програми/Квантова_інформатика_2020.pdf)>. [21 lypnya 2021].
9. Bolesta, IM 2016. *Kvantovi kompyutery ta kvantovi obchyslennya. Prohrama vyvchennya navchal'noyi dystsypliny (Quantum computers and quantum calculations. The program of study of the discipline)*, Lvivsky natsional'nyy universytet imeni Ivana Franka, Lviv. Dostupno: <[https://electronics.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/Prog\\_KKKO-.pdf](https://electronics.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/Prog_KKKO-.pdf)>. [21 lypnya 2021]
10. Hlushkov, OV, Khetselius, OYu, Svyarenko, AA & Buyadzhyy, VV 2020. *Matematychni osnovy kvantovoho komp'yutynhu. Sylabus navchal'noyi dystsypliny*. (Mathematical foundations of quantum computing. The syllabus of the

- discipline), Odeskyy derzhavnyy ekolohichnyy universytet, Odesa. Dostupno: <<http://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint/7710/>>. [21 lypnya 2021].
11. Hnatenko, Kh 2020. 'Kvantovi kompyutery: sohodennya ta maybutnye (Quantum computers: the present and the future)', *Kolosok*, № 5, s. 2-7. Dostupno: <<https://e-kolosok.org/khrystyna-hnatenko-neymovirne-u-kvantovomu-sviti/>>. [21 lypnya 2021].
  12. Hnatenko, Kh 2020. 'Neymovirne u kvantovomu sviti (The unbelievable in a quantum world)', *Kolosok*, № 4, s. 2-7. Dostupno: <<https://e-kolosok.org/khrystyna-hnatenko-neymovirne-u-kvantovomu-sviti/>>. [21 lypnya 2021].
  13. Hnatenko, KP, Tkachuk, VM, Chornodolsky, YaM & Samar, MI 2020. *Kvantovi komp'yutery ta kvantove prohramuvannya. Osvitno-profesiynna prohrama (Quantum computers and quantum programming. Educational and professional program)*, Lvivsky natsionalnyy universytet imeni Ivana Franka, Lviv. Dostupno: <[https://physics.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/OP\\_bak\\_kvant\\_comp\\_2020.pdf](https://physics.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/OP_bak_kvant_comp_2020.pdf)>. [21 lypnya 2021].
  14. Lehka, L, Shokalyuk, S & Bohunencko, Ye 2021. 'Propedevtyka vyvchennya kvantovoyi informatyky u profil'niy (starshiy) shkoli (Propaedeutics of studying quantum computer science in a specialized (high) school)', *Fizyko-matematychna osvita*, 28 (2), pp. 51–56. doi: 10.31110/2413-1571-2021-028-2-009. [21 lipnya 2021].
  15. Mayzelis, ZO 2017. *Suchasni problemy fizyky: kvantovyy kompyuter. Robocha prohrama navchal'noyi dystsypliny (Modern problems of physics: the quantum computer. Working program of the discipline)*, Kharkivsky natsionalnyy universytet imeni V. N. Karazina, Kharkiv. Dostupno: <[http://kaf-theorphys.univer.kharkov.ua/Robochi%20oprogramy/Rob\\_pr\\_navch\\_dysc\\_2017-2018/Zag\\_kursy\\_PDFs%20for%20Site/Kvantovyy\\_komputer\\_2017-18\\_osv\\_nauk\\_prof.pdf](http://kaf-theorphys.univer.kharkov.ua/Robochi%20oprogramy/Rob_pr_navch_dysc_2017-2018/Zag_kursy_PDFs%20for%20Site/Kvantovyy_komputer_2017-18_osv_nauk_prof.pdf)>. [21 lypnya 2021].
  16. *Natsionalnyy instytut stratehichnykh doslidzhen* 2020. Analitychna dopovid do shchorichnoho Poslannya Prezydenta Ukrayiny do Verkhovnoyi Rady Ukrayiny "Pro vnutrishnye ta zovnishnye naselennya Ukrayiny" (Analytical Report to the Annual Address of the President of Ukraine to the Verkhovna Rada of Ukraine "On the Internal and External Population of Ukraine"), Kyiv. Dostupno: <<https://niss.gov.ua/publikacii/poslannya-prezidenta-ukraini/analitichna-dopovid-do-schorichnogo-poslannya-prezidenta-4>>. [21 lypnya 2021].
  17. Nosov, VV 2018. *Kvantovi obchyslennya i kryptohrafiya. Prohrama navchalnoyi dystsypliny (Quantum computing and cryptography. Curriculum of the discipline)*, Kharkivsky natsionalnyy universytet vnutrishnikh sprav, Kharkiv. Dostupno: <<https://lib.univd.edu.ua/?action=predmet&id=107639>>. [21 lypnya 2021].
  18. Pinkevych, IP, Dmytruk, IM, Yeshchenko, OA & Kravchenko, VM 2018. *Kvantovi kompyutery, obchyslennya, informatsiya. Osvitno-naukova prohrama na zdobuttya osvitnoho stepenyu Mahistr, za spetsialnistyu "104 Fizyka ta astronomiya"* (Quantum computers, calculations, information. Educational and scientific program for obtaining a master's degree, specialty "104 Physics and Astronomy"). Kyivsky natsionalnyy universytet imeni T. H. Shevchenka, Kyiv. Dostupno: <[https://www.phys.univ.kiev.ua/wp-content/uploads/2021/05/onp\\_magistry\\_kvant\\_komp\\_obch\\_inf\\_last\\_03\\_12\\_2018.pdf](https://www.phys.univ.kiev.ua/wp-content/uploads/2021/05/onp_magistry_kvant_komp_obch_inf_last_03_12_2018.pdf)>. [21 lypnya 2021].
  19. Ponomarov, OH 2020. *Kvantovi tekhnolohiyi v kompyuterniy tekhnitsi. Syllabus navchalnoyi dystsypliny. (Quantum technologies in computer technology. The syllabus of the discipline)*, Sumskyy derzhavnyy universytet, Sumy. Dostupno: <[https://ekt.elit.sumdu.edu.ua/images/PDF\\_documents/CLBS/3.pdf](https://ekt.elit.sumdu.edu.ua/images/PDF_documents/CLBS/3.pdf)>. [21 lypnya 2021].
  20. Semerikov, SO 2020. *Kvantove prohramuvannya. Syllabus navchalnoyi dystsypliny (Quantum programming. The syllabus of the discipline)*, Kryvorizkyy derzhavnyy pedahohichnyy universytet. Dostupno:

<<https://drive.google.com/file/d/1A2GxCYPl7bnKTUoUuPMFETXVqzHkiSVN/view>>. [21 липня 2021].

21. Tkachuk, VM, Hnatenko, KhP, Chornodolsky, YAM & Samar, MI 2021. *Kvantovi komputery ta kvantove prohramuвання. Osvitno-naukova prohrama (Quantum computers, calculations, information. Educational and scientific program)*, Lvivskyy natsionalnyy universytet imeni Ivana Franka, Lviv. Dostupno: <[https://physics.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/OP\\_mag\\_kvant\\_comp\\_1.9\\_2021.pdf](https://physics.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/OP_mag_kvant_comp_1.9_2021.pdf)>. [21 липня 2021].