

<https://doi.org/10.31891/2307-5740-2025-338-13>

УДК 330

ЯЦЕНКО Ольга

Київський національний економічний університет імені Вадима Гетьмана

<https://orcid.org/0000-0003-4399-2217>yacenkoolgakneu@gmail.com

МОРДАНЬ Вадим

Київський національний економічний університет імені Вадима Гетьмана

<https://orcid.org/0009-0006-7196-2276>vadym.mordan@gmail.com

ЯЦЕНКО Олександр

Київський національний економічний університет імені Вадима Гетьмана

<https://orcid.org/0000-0002-0388-728X>om.iatsenko@gmail.com

ПОТЕНЦІАЛ ВОДНЮ ДЛЯ СТАЛОГО РОЗВИТКУ ГЛОБАЛЬНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ: ІННОВАЦІЇ ТА ДИНАМІКА ТОРГІВЛІ

Енергетичні потреби сучасного суспільства зростають у міру розвитку технологій, зростання населення та економічного прогресу. Однак традиційні джерела енергії, такі як нафта, вугілля та природний газ, вже не здатні забезпечити сталий розвиток, оскільки їхні ресурси обмежені, а також вони спричиняють серйозні екологічні проблеми, такі як зміни клімату, забруднення повітря та води. Відновлювані джерела енергії, зокрема воднева енергетика, стають все більш важливими для забезпечення сталого майбутнього.

В статті акцентується увага, що одним із головних напрямів розвитку відновлюваної енергетики є водень. Це універсальний енергетичний носій, який має високу енергетичну щільність, його можна виробляти з відновлюваних джерел і він має мінімальний вплив на навколишнє середовище. Водень стає дедалі важливішим через необхідність декарбонізації промисловості, транспорту та енергетичних систем, що відповідає вимогам міжнародних угод і стратегій щодо зменшення викидів вуглецю. Попит на водень зростає у зв'язку з активним розвитком водневої економіки. Обсяг глобального ринку водню у 2022 році становив близько 156 мільярдів доларів США, і очікується, що до 2030 року він збільшиться до 385 мільярдів доларів із середньорічним темпом зростання (CAGR) на рівні 11,98% [1]. Лідерами на ринку є країни, які активно інвестують у водневі технології, такі як Японія, Німеччина, США, Китай і Південна Корея. Вони зосереджені на розвитку електролізу, створенні водневих кластерів, а також інтеграції водню в транспортні системи.

В статті підкреслено, що важливим фактором є розвиток сучасних технологій транспортування та зберігання водню. Водень потребує спеціальних умов для зберігання та транспортування, і інноваційні рішення, такі як зріджений водень, трубопроводи, а також спеціалізовані контейнери, дозволяють підвищити ефективність транспортування. Це, в свою чергу, знижує витрати та підвищує доступність водню для використання в енергетичних системах.

Обґрунтовано, що перспективи водневої енергетики включають її можливість забезпечити до 18% світових енергетичних потреб до 2050 року. Сучасні інвестиції, міжнародні ініціативи та розвиток технологій водневої економіки відкривають нові можливості для досліджень та міжнародного співробітництва, що забезпечить подальший розвиток водневих технологій і збільшить їхню роль у глобальній енергетичній системі.

Ключові слова: водень, глобальна енергетика, інновації, міжнародна торгівля, відновлювані / альтернативні джерела енергії, енергетичні потреби, зелена енергетика, екологічно чисті джерела енергії, ресурси, викопне паливо, викиди вуглецю, декарбонізація, міжнародні угоди, концепція чистого нуля.

YATSENKO Olha, MORDAN Vadym, IATSENKO Oleksandr

Kyiv National Economic University named after Vadym Hetman

HYDROGEN'S POTENTIAL FOR SUSTAINABLE GLOBAL ENERGY DEVELOPMENT: INNOVATION AND TRADE DYNAMICS

The energy demands of modern society are growing alongside technological advancements, population increases, and economic progress. However, traditional energy sources such as oil, coal, and natural gas can no longer ensure sustainable development due to their finite nature and significant environmental impacts, including climate change, air, and water pollution. Renewable energy sources, particularly hydrogen energy, are becoming increasingly critical for securing a sustainable future.

The article emphasizes that hydrogen is one of the key directions for developing renewable energy. Hydrogen is a versatile energy carrier with high energy density that can be produced from renewable sources and has minimal environmental impact. Its importance is rising due to the urgent need to decarbonize industries, transportation, and energy systems, in line with the requirements of international agreements and strategies to reduce carbon emissions. Demand for hydrogen is increasing as the hydrogen economy expands. In 2022, the global hydrogen market was valued at approximately \$156 billion, and it is projected to grow to \$385 billion by 2030, with a compound annual growth rate (CAGR) of 11.98% [1]. Leading players in the market include countries actively investing in hydrogen technologies, such as Japan, Germany, the United States, China, and South Korea. These nations focus on advancing electrolysis, developing hydrogen clusters, and integrating hydrogen into transportation systems.

The article highlights that the development of modern hydrogen transportation and storage technologies is a critical factor. Hydrogen requires specific conditions for storage and transport, and innovative solutions—such as liquefied hydrogen, pipelines, and specialized containers—enhance transportation efficiency. This, in turn, reduces costs and increases the availability of hydrogen for use in energy systems.

It is argued that the prospects for hydrogen energy include the potential to meet up to 18% of the world's energy needs by 2050. Current investments, international initiatives, and advancements in hydrogen economy technologies open new

opportunities for research and global collaboration, ensuring the continued development of hydrogen technologies and their increasing role in the global energy system.

Keywords: hydrogen, global energy, innovations, international trade, renewable/alternative energy sources, energy needs, green energy, environmentally friendly energy sources, resources, fossil fuels, carbon emissions, decarbonization, international agreements, net zero emission scenario.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Проблема енергії набуває дедалі більшої актуальності та значущості в сучасному світі. Із зростанням чисельності населення та його потреб суттєво збільшується попит на енергоресурси. Для забезпечення зростаючих енергетичних потреб і переходу до чистої енергії країни дедалі активніше використовують відновлювані джерела енергії поряд із традиційним викопним паливом. Очікується, що потреба в енергії зростатиме експоненційно в найближчі десятиліття [2]. Водночас запаси викопного палива, такого як нафта, вугілля та природний газ, обмежені, що вимагає пошуку нових джерел енергії. Використання викопного палива спричиняє значний негативний вплив на довкілля, зокрема сприяє зміні клімату та глобальному потеплінню.

Відновлювані джерела енергії характеризуються значно меншим впливом на довкілля порівняно з традиційними методами виробництва енергії. Вони є екологічно чистим джерелом енергії, що майже не спричиняє викидів вуглецю. Хоча будь-яка людська діяльність може мати певний вплив на навколишнє середовище, з огляду на екологічну безпеку, відновлювані методи виробництва енергії є більш пріоритетними порівняно з іншими підходами.

Воднева енергія є одним із перспективних джерел енергії, що набули широкого поширення в останні роки. Завдяки своїм екологічним перевагам і високій енергетичній ефективності, водень може слугувати альтернативою викопному паливу. Хоча воднева енергія має значний потенціал стати одним із ключових джерел енергії майбутнього, також існують певні технічні та технологічні виклики, які потребують подальшого вдосконалення.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Розвиток водневої енергетики є стратегічним напрямком забезпечення сталого розвитку, що базується на принципах декарбонізації та циркулярної економіки. Сучасні виклики глобальної енергетики, пов'язані із необхідністю зменшення вуглецевих викидів та диверсифікації енергетичних ресурсів, визначають ключову роль водню у міжнародній співпраці. Було враховано нещодавні дослідження [3,4], в якому сфокусовано увагу на динаміці міжнародної торгівлі воднем та бар'єрах, що виникають через геополітичні та економічні чинники. Фінансова складова стратегій розвитку водневої економіки, досліджена Халатур С. [5], визначає ключові напрями для інтеграції країни у глобальні енергетичні ринки. Аналіз економічної доцільності водневих проєктів дозволяє побудувати ефективну модель залучення інвестицій і стимулювання інновацій. У свою чергу, праці Резнікової Н. та Грод М. [6] досліджують макроекономічні аспекти циркулярного переходу, в тому числі так звані «зелені лебеді» декарбонізації, які можуть стимулювати сталий розвиток через водневі технології. Їхній внесок у формування нових інструментів оцінки ризиків та можливостей є невід'ємним елементом стратегування майбутнього глобальної енергетики. Потенціал водню для сталого розвитку глобальної енергетики та динаміку торгівлі було досліджено у звітах міжнародних приватних та державних організацій: McKinsey & Co та Hydrogen Council [7], The International Energy Agency (IEA) [8]. Інновації у водневій енергетиці було досліджено в наукових статтях Sage Sebastian (Department of Engineering Physics, Florida Polytechnic University), Samantha Wijewardane (Clean Energy Research Center, University of South Florida) та Sesha Srinivasan (Department of Engineering Physics, Florida Polytechnic University) [9].

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Метою дослідження є визначення потенціалу водневої енергетики як екологічно чистого джерела енергії, теоретичний аналіз сучасних інновацій у виробництві, зберіганні, транспортуванні та використанні водню, а також обґрунтування перспектив його розвитку на глобальному рівні.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

У 2022 році глобальне споживання водню зросло до 95 млн тонн [8]. Цей показник відображає продовження тенденції зростання, яка була тимчасово перервана у 2020 році через пандемію COVID-19 та пов'язаний з нею економічний спад.

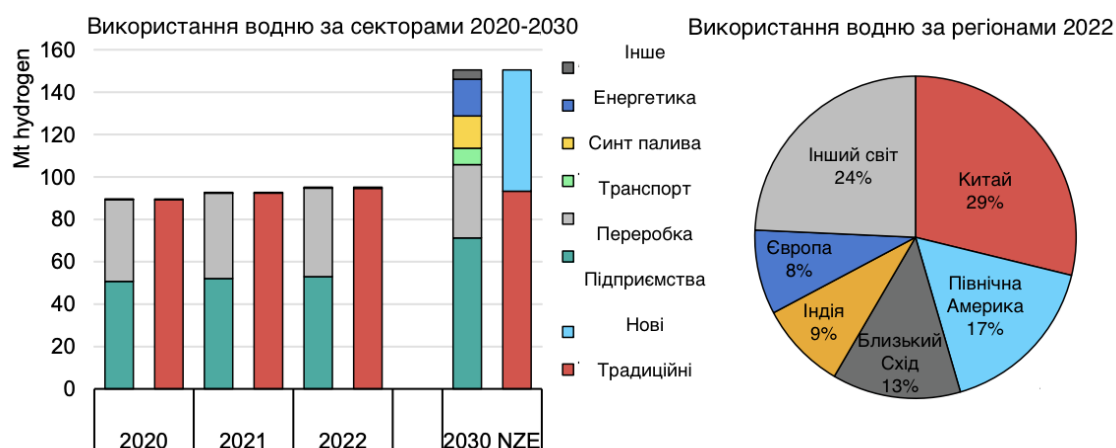


Рис.1 Секторний та регіональний розподіл використання водню: поточні дані та прогнози відповідно до концепції досягнення чистих нульових викидів до 2050 року, 2020–2030 роки

Джерело: Global Hydrogen Review 2023. URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ecdfc3bb-d212-4a4c-9ff7-6ce5b1e19cef/GlobalHydrogenReview2023.pdf>

Споживання водню продемонструвало значне зростання у більшості ключових регіонів, за винятком Європи. У Європі використання водню суттєво скоротилося через зниження активності, особливо в хімічній промисловості, спричинене різким зростанням цін на природний газ під час енергетичної кризи, викликаной вторгненням Росії в Україну. Зокрема, кілька заводів з виробництва добрив скоротили обсяги виробництва або повністю зупинили роботу на тривалий період, що призвело до зниження споживання водню в регіоні майже на 6%. На противагу цьому, у Північній Америці та на Близькому Сході зафіксовано суттєве зростання споживання водню, яке склало близько 7% у кожному регіоні, що повністю компенсувало спад у Європі. У Китаї зростання було більш стриманим, на рівні близько 0,5%, однак країна залишається найбільшим споживачем водню у світі, забезпечуючи майже 30% його загального використання — більш ніж удвічі більше, ніж Сполучені Штати, які посідають друге місце за обсягами споживання [8].

Відповідно до прогнозу Міжнародної агенції з енергетики (IEA) глобальний попит на водень, який походить від незмінного викопного палива буде зменшуватись, і навпаки, зростатиме на водень з низьким рівнем викидів (рис.2).

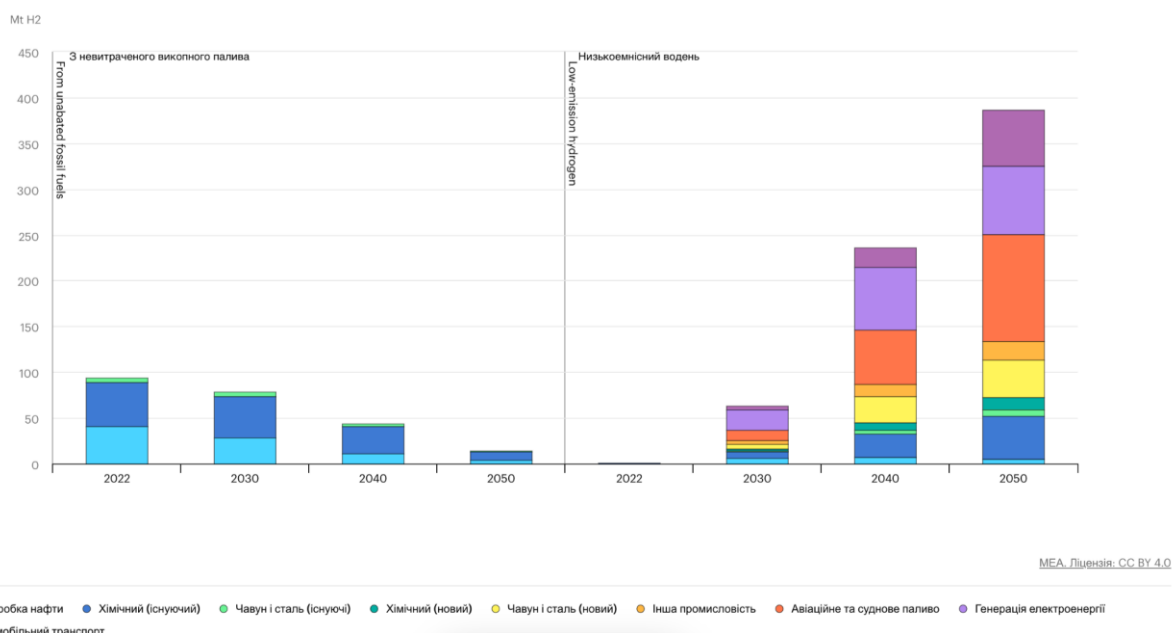


Рис. 2 Глобальний попит на водень у концепції чистого нуля, 2022-2050 pp
Джерело: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-hydrogen-demand-in-the-net-zero-scenario-2022-2050>

Глобальний ринок «зеленого» водню демонструє стійку тенденцію до зростання. Згідно зі звітом SNS Insider, у 2022 році його обсяг становив 156 мільярдів доларів, а до 2030 року прогнозується зростання до 385 мільярдів доларів зі середньорічним темпом приросту 11,98% [1].

Сьогодні водень знаходить широке застосування в нафтопереробній та хімічній промисловості (як основна сировина), сталеливарній промисловості (як відновний агент), а також у спеціальних галузях.

Потенціал водню в цих секторах значною мірою буде визначатися динамікою ринкових умов у кожній з них. Теоретично водень може бути використаний у широкому спектрі застосувань як сировина, відновник або паливо. Проте він поки що не досяг масштабного використання в цих сферах через його обмежену конкурентоспроможність порівняно з існуючими викопними джерелами палива та іншими альтернативними технологіями з низьким рівнем викидів, а також через незрілість технологій кінцевого використання. Однак очікується, що зусилля щодо декарбонізації стимулюватимуть впровадження водню в деяких із цих нових застосувань, особливо в секторах, де скорочення викидів є складним або взагалі недоступним без застосування таких технологій [3].

Моніторинг використання водню сам по собі недостатній для оцінки прогресу впровадження водневої енергетики, особливо щодо того, чи відповідає вона вимогам та темпам, необхідним для того, щоб водень сприяв переходу до чистої енергії. Важливо також аналізувати використання водню за конкретними застосуваннями, щоб оцінити його потенціал впровадження в нові сфери. Для звітності в рамках Global Hydrogen Review MEA [8] було визначено дві основні категорії використання водню:

- **Традиційні застосування**, які включають переробку, використання водню як сировини для виробництва аміаку, метанолу та інших хімічних продуктів, а також як відновлюючого агента для виробництва заліза прямого відновлення (DRI) за допомогою синтетичного газу на основі викопного палива. Ця категорія також охоплює використання водню в електроніці, виробництві скла та металообробці, хоча в цих секторах обсяг споживання водню залишається незначним (близько 1 млн тонн на рік) і вони не включені до нашого моніторингу.

- **Потенційні нові застосування** водню, такі як використання його як відновника в 100% водневих процесах прямого відновлення заліза (DRI), транспорт, виробництво водневих палив (наприклад, аміак або синтетичні вуглеводні), модернізація біопалива, високотемпературне нагрівання в промислових процесах та електроенергетика для зберігання та генерації, а також інші програми, де очікується незначне використання водню через наявність більш ефективних альтернатив з низькими викидами.

Серед перспективних напрямів використання водневої енергетики особливу увагу варто звернути на транспорт. Зростання використання водню в автомобільному транспорті досягло приблизно 45% у 2022 році порівняно з 2021 роком [10], хоча з відносно низької початкової точки. Електромобілі на паливних елементах (FCEV) вже досягли певного успіху в продажах у сегментах легкових автомобілів і автобусів, але зі збільшенням продажів важких вантажівок на паливних елементах їх частка у загальному споживанні швидко зростає. Оскільки Китай зосередився на автомобілях великої вантажопідйомності та відіграє важливу роль у розгортанні вантажівок на паливних елементах, хоча лише 20% усіх автомобілів FCEV знаходяться в Китаї, вони використовують більше половини водню в автомобільному транспорті. Основна частина використання водню у транспорті ймовірно залишиться в автомобільному секторі на найближчі роки, але залізничний транспорт також збільшує попит на водень, оскільки водневі поїзди випробовуються і застосовуються на більшій кількості маршрутів. Крім того, кілька паливних елементів поромів планують запуск у 2023 році, що дозволить ще більше розширити використання водню для транспортних додатків. Замовлення на судна, пристосовані для роботи з аміаком і метанолом, також можуть призвести до додаткового використання водню у судноплавстві в найближчі роки, якщо ці технології досягнуть комерційної зрілості.

Для реалізації концепції чистих нульових викидів, використання синтетичного авіаційного гасу та навіть пряме використання водню як авіаційного палива в найближчі роки збільшить попит на водень у транспорті. Важливо прискорити впровадження водню та водневих палив, а також передових технологій, які наразі ще не досягли комерційної зрілості. Тобто, відповідно до концепції нульових викидів [11], до 2030 року майже 8 мільйонів тонн водню має бути використано безпосередньо в транспортному секторі, переважно в автомобільному (50%) та морському (45%). Близько 8 мільйонів тонн припадає на виробництво аміаку та синтетичного палива для судноплавства та авіації.

Водень є одним із найпоширеніших елементів у природі, хоча здебільшого він зустрічається не в чистому вигляді. Його отримують із різноманітних джерел, зокрема викопного палива, ядерної та відновлюваної енергетики. Серед найбільш поширених методів отримання водню — електроліз води та парова конверсія метану [12]. Електролізери відіграють ключову роль у виробництві зеленого водню. Серед найбільших електролізерів, доступних сьогодні на ринку, виділяються Siemens Silyzer 300 і Cummins Hylyzer. Обидва пристрої використовують технологію протонообмінної мембрани, що дозволяє виробляти надчистий водень із вмістом кисню менше 100 ppm.

Останніми роками продуктивність комерційних електролізерів суттєво зросла завдяки технологічним досягненням та інноваціям. Наприклад, використання нових матеріалів для мембран дозволяє зменшити енергетичні втрати та підвищити стійкість до екстремальних умов експлуатації. Крім того, інтеграція штучного інтелекту в системи управління електролізерами дала змогу оптимізувати виробничі процеси, автоматизувати контроль за станом обладнання та знижувати витрати на обслуговування. Як результат, сучасний Silyzer 300 здатен виробляти 340 кг водню за годину, при ефективності системи >75% [13].

Ефективне та економічно вигідне зберігання водню є важливим елементом для його широкомасштабного використання. Протягом понад десяти років для комерційного зберігання газоподібного водню успішно застосовуються підземні соляні шахти [14]. Ці шахти є штучними порожнинами, створеними всередині соляних куполів. Процес передбачає впорскування води через бурові свердловини для розчинення солі, після чого розчинена солоня вода видаляється, утворюючи великі герметичні порожнини, придатні для зберігання водню під тиском. Такі резервуари також можуть виконувати функцію буферного сховища для водневих трубопровідних мереж. Компанії SSE Thermal і Equinor розробляють проєкт одного з найбільших у світі водневих сховищ, яке планується ввести в експлуатацію у 2028 році [15]. Сховище, розташоване на узбережжі Східного Йоркшира у Великій Британії, матиме очікувану потужність, еквівалентну 320 ГВт-год енергії. Паралельно Mitsubishi Power Americas та Magnum Development розпочали будівництво підземного соляного сховища в штаті Юта потужністю 300 ГВт-год. У рамках цього проєкту вони планують запустити комбіновану електростанцію, яка спочатку працюватиме з 30% екологічно чистого водню та 70% природного газу у 2025 році, поступово переходячи до використання 100% екологічно чистого водню в 2045 році.

Для транспортування водню на невеликі відстані оптимальними рішеннями є трубопроводи та вантажівки. Проте зі збільшенням обсягу чи відстані виникає необхідність у застосуванні інших методів. Три основні носії енергії, які забезпечують можливість транспортування водню на значні відстані, — це аміак, рідкі органічні водневі сполуки (ЛОНС) та рідкий водень [16]. Аміак є одним із ключових варіантів для забезпечення великомасштабного транспортування водню. Ця хімічна сполука, широко застосовувана як сировина для виробництва добрив, також має значний потенціал як засіб для зберігання та транспортування водню. Аміак як носій водню виробляється за допомогою процесу синтезу, у якому водень взаємодіє з азотом, утворюючи рідкий аміак. Отриману рідину зручно зберігати у спеціальних цистернах, що значно спрощує транспортування. По прибуттю до місця призначення аміак піддається процесу розщеплення, у результаті якого вивільняються водень і азот. Після очищення водень стає придатним для подальшого використання [16]. Також, процес транспортування може бути реалізований за допомогою рідких органічних водневих сполук (ЛОНС). Це рідина, що здатна поглинати та вивільняти водень у результаті хімічної реакції. Рідкі органічні водневі сполуки поглинають водень у процесі гідратування, який відбувається за підвищеного тиску та температури у присутності каталізатора. Навіть у насиченому воднем стані ЛОНС можна легко зберігати або транспортувати за умов атмосферного тиску та температури.

Ще одним перспективним варіантом ефективного транспортування водню є його перетворення в рідкий стан. Рідкий водень має значно вищу щільність порівняно з газоподібним, це дозволяє транспортувати значно більшу кількість водню в одному і тому ж об'ємі сховища. Для перетворення газоподібного водню на рідкий його охолоджують до температури $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ [3]. У такому вигляді водень може транспортуватися та зберігатися, за умови забезпечення високого рівня термоізоляції. При підвищенні температури рідкий водень втрачає свою рідку форму та переходить у газоподібний стан. Після транспортування або тимчасового зберігання водень повертається до газоподібного стану за допомогою випарника.

Незважаючи на очевидний потенціал водню, міжнародна торгівля цим ресурсом поки що перебуває на початковому етапі свого становлення. Одним із ключових кроків у напрямку міжнародної водневої співпраці став меморандум про взаєморозуміння між Канадою та Німеччиною, підписаний у березні 2024 року [17]. Ця угода передбачає підтримку співпраці між канадськими виробниками водню та німецькими промисловими підприємствами. Зокрема, документ орієнтований на створення інфраструктури для транспортування чистого водневого палива та стимулювання його використання у промисловості та енергетиці. Угода демонструє приклад того, як дві країни можуть формувати взаємовигідні партнерства, спрямовані на зменшення залежності від традиційних викопних джерел енергії.

Попри успіхи, виклики міжнародної торгівлі воднем залишаються значними. Перш за все, відсутність єдиних стандартів і регламентів ускладнює інтеграцію водню в глобальні ринки. Крім того, транспортування водню на великі відстані потребує значних інновацій у сфері логістики та інфраструктури. Наразі більшість країн концентруються на локальному виробництві й використанні водню, а міжнародна торгівля обмежується окремими двосторонніми ініціативами.

Проте перспективи розвитку цього ринку є значними. Зі зростанням кількості інвестицій у водневі технології та інфраструктуру очікується збільшення міжнародного обміну воднем, зокрема між країнами з високим потенціалом виробництва чистої енергії (такими як Канада, Австралія, країни Близького Сходу) та країнами-споживачами з розвиненою промисловістю (Німеччина, Японія, Південна Корея). Водень стає ключовим елементом у розробці стратегій декарбонізації, і розвиток міжнародної торгівлі ним сприятиме не лише економічному зростанню, але й досягненню глобальних цілей сталого розвитку [4]. Подальша стандартизація, фінансування інфраструктурних проєктів та укладання нових угод створять умови для перетворення водню на один із головних енергетичних ресурсів ХХІ століття.

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

Водень стає ключовим елементом трансформації світової енергетики, пропонуючи інноваційні рішення для декарбонізації, зміцнення енергетичної безпеки та сталого розвитку. Аналіз потенціалу цього ресурсу свідчить про його критичну роль у забезпеченні глобального переходу до чистої енергії.

Впровадження технологій для ефективного виробництва, зберігання та транспортування водню є рушійною силою водневої економіки. Нові електролізери, методи зрідження та зберігання дозволяють інтегрувати водень у промисловість, транспорт і енергетику, значно зменшуючи вуглецевий слід. Розвиток глобальних водневих коридорів відкриває нові можливості для експорту водню країнами, багатими на відновлювані джерела енергії, до регіонів із високим попитом. Проте для створення ефективної торгівельної мережі необхідні стандарти, інфраструктура для транспортування та зберігання, а також міжнародна співпраця. Як універсальний енергетичний ресурс, водень відіграє ключову роль у досягненні кліматичних цілей. Його використання в авіації, судноплаванні, металургії та інших галузях, де альтернативні технології недоступні, має вирішальне значення. Крім того, водень сприяє інтеграції відновлюваних джерел енергії, балансує нестабільність генерації.

Водень має потенціал стати основою сталого розвитку енергетики, об'єднуючи інновації та міжнародні зусилля. Його впровадження може радикально змінити енергетичний ландшафт, забезпечуючи екологічну та економічну стабільність.

Література

1. Green hydrogen Market Size, Share & Segmentation By Application (Power generation, Transportation, Methanol Production), By Technology (Alkaline electrolyze, Polymer electrolyte Membrane), by Distribution channel (Pipeline, cargo), by End User (Chemical, Power, Medical, automobile) by Region and Global Forecast for 2024-2031. URL: <https://www.snsinsider.com/reports/green-hydrogen-market-2790>
2. Meghan Gordon, Maya Weber. Global energy demand to grow 47% by 2050, with oil still top source: US EIA. URL: <https://www.spglobal.com/commodity-insights/en/news-research/latest-news/crude-oil/100621-global-energy-demand-to-grow-47-by-2050-with-oil-still-top-source-us-eia>
3. Yatsenko O., Iatsenko O. Trends and prospects in international hydrogen trade in the face of new barriers and challenges to global cooperation. Actual Problems of International Relations, Onysyuk, S. (2024). Mechanisms of international economic cooperation to support the global energy transition: ways to improve. Collection of Scientific Papers "Scientific Notes", 36 (3), 254-271. http://doi.org/10.33111/vz_kneu.36.24.03.22.152.158 issue 161, P. 69-81.
4. Yatsenko O, Panchenko V., Ivashchenko O. (2024). Climatic limitations of economic growth as challenges of financing international investment projects in the sphere of circular economy. Herald of Khmelnytskyi National University. Economic Sciences, 332(4), 82-89. <https://doi.org/10.31891/2307-5740-2024-332-11>.
5. Khalatur, S. (2024). Financial component of the hydrogen economy development strategy of Ukraine. Collection of Scientific Papers "Scientific Notes", 36 (3), 242-253. http://doi.org/10.33111/vz_kneu.36.24.03.21.145.151
6. Reznikova N., Grod M. (2024). Macroeconomic impacts of the circular transition: the green swans of decarbonization on the path to sustainability. Actual Problems of International Relations, issue 160, P/ 110-120.
7. Hydrogen trade outlook: 2023 Update. URL: <https://www.mckinsey.com/industries/oil-and-gas/our-insights/oil-and-gas-blog/hydrogen-trade-outlook-2023-update>
8. Global Hydrogen Review 2023. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. p. 20-21. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-hydrogen-demand-in-the-net-zero-scenario-2022-2050>
9. Recent advances in hydrogen production, storage, and fuel cell Technologies with an emphasis on inventions, innovations, and commercialization. Sage Sebastian, Samantha Wijewardane. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772940023000334>
10. Global Hydrogen Review 2023. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. p. 29. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-hydrogen-demand-in-the-net-zero-scenario-2022-2050>
11. Net Zero Emissions by 2050 Scenario (NZE). URL: <https://www.iea.org/reports/global-energy-and-climate-model/net-zero-emissions-by-2050-scenario-nze>
12. Methods to Produce Hydrogen, Research by the North Sea Programme of the European Regional Development Fund of the European Union. URL: <https://pureenergycentre.com/zemport/wp-content/uploads/2023/05/MODULE-2-Hydrogen-Training-Course-ZEMPORT.pdf>
13. Overview of the PEM Silyzer Family by Siemens. URL: https://4echile.cl/wp-content/uploads/2020/10/20200930-SE-NEB-PEM-Electrolyzer-and-Applications_EW.pdf
14. Storing Hydrogen in Underground Salt Caverns. URL: <https://www.linde.com/clean-energy/our-h2-technology/hydrogen-storage#:~:text=Hydrogen%20Storage,-Share&text=For%20bulk%20storage%20of%20very,backup%20for%20a%20pipeline%20network>
15. World's largest underground hydrogen storage project. URL: <https://www.pv-magazine.com/2022/08/04/worlds-largest-underground-hydrogen-storage-project/>

16. Hydrogen transportation: three well-known energy carriers compared. URL: <https://demaco-cryogenics.com/blog/hydrogen-transportation-three-energy-carriers/>
17. Canada signs hydrogen deal with Germany, cites need to shun Russia energy. URL: <https://www.reuters.com/sustainability/climate-energy/canada-signs-hydrogen-deal-with-germany-cites-need-shun-russia-energy-2024-03-18/>

References

1. Green hydrogen Market Size, Share & Segmentation By Application (Power generation, Transportation, Methanol Production), By Technology (Alkaline electrolyze, Polymer electrolyte Membrane), by Distribution channel (Pipeline, cargo), by End User (Chemical, Power, Medical, automobile) by Region and Global Forecast for 2024-2031. URL: <https://www.snsinsider.com/reports/green-hydrogen-market-2790>
2. Meghan Gordon, Maya Weber. Global energy demand to grow 47% by 2050, with oil still top source: US EIA. URL: <https://www.spglobal.com/commodity-insights/en/news-research/latest-news/crude-oil/100621-global-energy-demand-to-grow-47-by-2050-with-oil-still-top-source-us-eia>
3. Yatsenko O., Iatsenko O. Trends and prospects in international hydrogen trade in the face of new barriers and challenges to global cooperation. Actual Problems of International Relations, Onysyuk, S. (2024). Mechanisms of international economic cooperation to support the global energy transition: ways to improve. Collection of Scientific Papers "Scientific Notes", 36 (3), 254-271. http://doi.org/10.33111/vz_kneu.36.24.03.22.152.158issue 161, P. 69-81.
4. Yatsenko O, Panchenko V., Ivashchenko O. (2024). Climatic limitations of economic growth as challenges of financing international investment projects in the sphere of circular economy. Herald of Khmelnytskyi National University. Economic Sciences, 332(4), 82-89. <https://doi.org/10.31891/2307-5740-2024-332-11>.
5. Khalatur, S. (2024). Financial component of the hydrogen economy development strategy of Ukraine. Collection of Scientific Papers "Scientific Notes", 36 (3), 242-253. http://doi.org/10.33111/vz_kneu.36.24.03.21.145.151
6. Reznikova N., Grod M. (2024). Macroeconomic impacts of the circular transition: the green swans of decarbonization on the path to sustainability. Actual Problems of International Relations, issue 160, P/ 110-120.
7. Hydrogen trade outlook: 2023 Update. URL: <https://www.mckinsey.com/industries/oil-and-gas/our-insights/oil-and-gas-blog/hydrogen-trade-outlook-2023-update>
8. Global Hydrogen Review 2023. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. p. 20-21. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-hydrogen-demand-in-the-net-zero-scenario-2022-2050>
9. Recent advances in hydrogen production, storage, and fuel cell Technologies with an emphasis on inventions, innovations, and commercialization. Sage Sebastian, Samantha Wijewardane. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772940023000334>
10. Global Hydrogen Review 2023. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. p. 29. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-hydrogen-demand-in-the-net-zero-scenario-2022-2050>
11. Net Zero Emissions by 2050 Scenario (NZE). URL: <https://www.iea.org/reports/global-energy-and-climate-model/net-zero-emissions-by-2050-scenario-nze>
12. Methods to Produce Hydrogen, Research by the North Sea Programme of the European Regional Development Fund of the European Union. URL: <https://pureenergycentre.com/zemport/wp-content/uploads/2023/05/MODULE-2-Hydrogen-Training-Course-ZEMPORT.pdf>
13. Overview of the PEM Silyzer Family by Siemens. URL: https://4echile.cl/wp-content/uploads/2020/10/20200930-SE-NEB-PEM-Electrolyzer-and-Applications_EW.pdf
14. Storing Hydrogen in Underground Salt Caverns. URL: <https://www.linde.com/clean-energy/our-h2-technology/hydrogen-storage#:~:text=Hydrogen%20Storage,-Share&text=For%20bulk%20storage%20of%20very,backup%20for%20a%20pipeline%20network>
15. World's largest underground hydrogen storage project. URL: <https://www.pv-magazine.com/2022/08/04/worlds-largest-underground-hydrogen-storage-project/>
16. Hydrogen transportation: three well-known energy carriers compared. URL: <https://demaco-cryogenics.com/blog/hydrogen-transportation-three-energy-carriers/>
17. Canada signs hydrogen deal with Germany, cites need to shun Russia energy. URL: <https://www.reuters.com/sustainability/climate-energy/canada-signs-hydrogen-deal-with-germany-cites-need-shun-russia-energy-2024-03-18/>