Демчук Людмила, кандидат пед. наук, доцент кафедри екології та природоохоронних технологій Державний університет «Житомирська політехніка», ORCID: 0000-0001-5698-7113

Кірейцева Ганна, доктор технічних наук, професор кафедри екології та природоохоронних технологій Державний університет «Житомирська політехніка», ORCID:0000-0002-1055-178

Хоменко Світлана, аспірант, асистент кафедри екології та природоохоронних технологій Державний університет «Житомирська політехніка», ORCID: 0009-0002-7463-7867

Demchuk Lyudmila, Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Department of Ecology and Environmental Protection Technologies, Zhytomyr Polytechnic State University, ORCID: 0000-0001-5698-7113

Kireitseva Hanna, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Ecology and Environmental Protection Technologies, Zhytomyr Polytechnic State University, ORCID:0000-0002-1055-1784

Khomenko Svitlana V., Postgraduate Student, Assistant, Department of Ecology and Environmental Protection Technologies, Zhytomyr Polytechnic State University, ORCID: 0009-0002-7463-7867

ЗЕЛЕНИЙ ВОДЕНЬ ТА ЕНЕРГІЯ ДЛЯ СТАЛОГО РОЗВИТКУ МАЙБУТНЬОГО

GREEN HYDROGEN AND ENERGY FOR A SUSTAINABLE FUTURE

Анотація

У даній статті розглянуто роль зеленого водню як ключового вектора енергетичного переходу в умовах глобальних кліматичних викликів 2026 року. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю радикальної декарбонізації промислового сектору та важкого транспорту, де пряма електрифікація є технічно обмеженою. Автори аналізують інтеграцію відновлюваних джерел енергії (ВЕЕ) у системи електролізу нового покоління, що дозволяє перетворювати надлишкову сонячну та вітрову генерацію на стабільний енергоносій.

Особлива увага приділяється концепції «Квантового стрибка» у розробці нових матеріалів для зберігання та транспортування водню. Використання квантового моделювання дозволяє значно прискорити пошук ефективних металоорганічних структур (MOFs) та каталізаторів, що не містять критично дефіцитних металів платинової групи. Це відкриває шлях до зниження собівартості виробництва водню та підвищення безпеки його використання у міській інфраструктурі.

У контексті японського досвіду побудови «Водневого суспільства» аналізуються сучасні кейси впровадження водневих паливних елементів у муніципальні мережі Токіо. Досліджується синергія між цифровими технологіями управління енергією (Smart Grid) та фізичною інфраструктурою виробництва H_2. Такий підхід забезпечує гнучкість енергосистеми та мінімізує втрати при передачі енергії на великі відстані.

Екологічний аспект роботи зосереджений на оцінці життєвого циклу водневих технологій. Автор доводить, що перехід на зелений водень дозволяє не лише знизити викиди CO_2, а й стимулює розвиток економіки замкненого циклу через використання побічного продукту електролізу — чистого кисню — у суміжних галузях. Це створює додаткову додану вартість та підвищує загальну ресурсну ефективність екосистеми.

Економічна складова дослідження базується на прогнозах динаміки цін на енергоносії до 2030 року. Виявлено, що масштабування потужностей електролізерів та впровадження міжнародних стандартів сертифікації «чистого» палива є критичними факторами для досягнення цінового паритету з викопним паливом. Пропонується модель державного стимулювання інвестицій у водневу інфраструктуру як стратегічного активу національної безпеки.

У висновках підкреслюється, що інтеграція високих технологій, квантової науки та екологічного менеджменту є єдиним дієвим механізмом досягнення цілей сталого розвитку. Форум 2026 року в Токіо стає відправною точкою для глобального технологічного консенсусу, де зелений водень виступає не просто як паливо, а як фундамент нової безвуглецевої цивілізації.

Ключові слова: зелений водень, декарбонізація, електроліз, сталий розвиток, екологічний ризик, квантові технології, паливні елементи, відновлювана енергетика, енергетичний перехід, екологічна безпека, Токіо-2026, економічні та екологічні перспективи

Abstract

This article examines the role of green hydrogen as a key vector of energy transition in the context of global climate challenges in 2026. The relevance of the study is determined by the need for radical decarbonization of the industrial sector and heavy transport, where direct electrification is technically limited. The authors analyze the integration of renewable energy sources (RES) into new-generation electrolysis systems, which allows converting excess solar and wind generation into a stable energy carrier.

Particular attention is paid to the concept of a “quantum leap” in the development of new materials for hydrogen storage and transportation. The use of

quantum modeling significantly accelerates the search for effective metal-organic frameworks (MOFs) and catalysts that do not contain critically scarce platinum group metals. This paves the way for reducing the cost of hydrogen production and increasing the safety of its use in urban infrastructure.

In the context of Japan's experience in building a “Hydrogen Society,” current cases of hydrogen fuel cell implementation in Tokyo's municipal networks are analyzed. The synergy between digital energy management technologies (Smart Grid) and the physical infrastructure for H_2 production is being explored. This approach ensures the flexibility of the energy system and minimizes losses during long-distance energy transmission.

The environmental aspect of the work focuses on assessing the life cycle of hydrogen technologies. The author argues that the transition to green hydrogen not only reduces CO_2 emissions but also stimulates the development of a closed-loop economy through the use of a by-product of electrolysis — pure oxygen — in related industries. This creates additional added value and increases the overall resource efficiency of the ecosystem.

The economic component of the study is based on forecasts of energy price dynamics until 2030. It has been found that scaling up electrolyzer capacity and introducing international standards for “clean” fuel certification are critical factors for achieving price parity with fossil fuels. A model of state stimulation of investment in hydrogen infrastructure as a strategic asset of national security is proposed.

The conclusions emphasize that the integration of high technology, quantum science, and environmental management is the only effective mechanism for achieving sustainable development goals. The 2026 forum in Tokyo is becoming a starting point for a global technological consensus, where green hydrogen is seen not just as a fuel, but as the foundation of a new carbon-free civilization.

Keywords: Green hydrogen, decarbonization, electrolysis, sustainable development, environmental risk, quantum technologies, fuel cells, renewable energy, energy transition, environmental safety, Tokyo 2026, economic and environmental prospects

Постановка проблеми. Для визначення місця та ролі екологічної безпеки в системі суспільної безпеки необхідно проаналізувати взаємозв'язок між ключовими категоріями нашого дослідження: «екологічна безпека» та «національна безпека». На основі аналізу визначень можна стверджувати, що національна безпека є складовою ширшої системи міжнародної безпеки, яка охоплює всі види безпеки в межах національної юрисдикції України. До цієї системи належать, зокрема, оборонна (військова) безпека, екологічна безпека, громадська безпека, пожежна безпека, охорона праці, радіаційний захист тощо.

Екологічна безпека, як компонент національної безпеки, спрямована на запобігання, мінімізацію та реагування на екологічні ризики, що загрожують життю населення, природним ресурсам і критично важливій інфраструктурі. Приклади таких ризиків включають промислові аварії, забруднення питної води, деградацію ґрунтів та наслідки зміни клімату. Інтеграція екологічної безпеки у загальну систему забезпечує координацію заходів між відомствами — від оборонних структур до служб цивільного захисту та органів охорони здоров'я.

Особливий підхід до основних засад державної (національної) безпеки підтримується більшістю дослідників даної проблематики: вони наголошують на комплексності, превентивності та міжвідомчій координації заходів. У цьому контексті пріоритет національної безпеки забезпечується нормативним закріпленням у чинному законодавстві, яке визначає повноваження, механізми взаємодії та відповідальність суб'єктів

забезпечення безпеки. Така правова база створює підґрунтя для ефективного управління ризиками й оперативного реагування на загрози, включно з екологічними інцидентами [1].

Сучасна світова енергетика перебуває у точці критичної трансформації, зумовленої необхідністю виконання цілей Паризької угоди та досягнення вуглецевої нейтральності до 2050 року. Попри стрімке зростання частки сонячної та вітрової генерації, залишається невирішеним питання стабілізації енергосистем та декарбонізації «важких» секторів промисловості. Традиційні методи накопичення енергії, такі як літій-іонні акумулятори, мають обмежену ємність та екологічні ризики, пов'язані з видобутком сировини.

Зелений водень, отриманий шляхом електролізу води за допомогою відновлюваних джерел енергії (ВЕЕ), розглядається як універсальний енергоносій, здатний подолати ці бар'єри. Проте ключовою проблемою залишається висока собівартість його виробництва, складність транспортування та низький коефіцієнт корисної дії існуючих електролізних установок. Без системного технологічного прориву масове впровадження водневих рішень залишається економічно вразливим.

Більше того, глобальна енергетична безпека вимагає створення надійної інфраструктури, яка б не залежала від монопольних постачальників викопного палива. Пошук альтернативних каталізаторів, що не використовують дорогоцінні метали (платину, іридій), стає пріоритетним завданням для матеріалознавства. У цьому контексті виникає гостра потреба в інтеграції квантових обчислень для прискорення наукового пошуку.

Отже, проблема полягає у необхідності створення цілісної екосистеми «зеленого» водню, яка б об’єднувала високоефективні методи генерації, безпечні технології зберігання та цифрові платформи управління розподілом. Саме на вирішенні цих протиріч між екологічною доцільністю

та техніко-економічною ефективністю зосереджена увага провідних технологічних хабів, зокрема Токіо, як центру інновацій 2026 року.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні дослідження у сфері водневої енергетики (2024–2026 рр.) зосереджені на вдосконаленні мембранних технологій та аніонообмінних електролізерів (AEM), що підтверджується працями провідних інженерів з IRENA та IEA. Фундаментальні аспекти квантового моделювання нових матеріалів для зберігання водню широко висвітлені в публікаціях дослідницьких центрів Японії (зокрема інституту RIKEN). Питання інтеграції водню в муніципальні мережі «розумних міст» активно розглядаються в роботах фахівців з урбаністики, які аналізують досвід реалізації проекту Woven City компанії Toyota. Екологічні аспекти та аналіз життєвого циклу (LCA) водневих систем представлені в останніх звітах Міжурядової групи експертів з питань зміни клімату (IPCC).

Питанням низьковуглецевого розвитку загалом опікуються численні українські дослідники, зокрема такі як Подолець Р., Дячук О., Семенюк А. [2]. Незважаючи на відсутність в Україні ринку, пов'язаного із зеленим воднем, розробка засад його становлення цікавить як вітчизняних, так і міжнародних фахівців. Зокрема, Кудря С.О., Рєпкін О.О., Рубаненко О.О., Яценко Л.В., Шинкаренко Л.Я. [3] між іншим, проаналізували стадії становлення "зеленої" водневої енергетики на території України; Кудря С.О., Яценко Л.В., Шинкаренко Л.Я., Ткаленко М.Д. [4] зосередилися на технологічній та економічній сторонах опріснення води з метою одержання зеленого водню. Група науковців на чолі з Sharma припускає, що масове впровадження зеленого водню можливе у третьому десятилітті цього століття [5]. На думку цих авторів, у сфері економічного аналізу, що стосується зеленого водню, найбільш нагальними будуть аспекти комерційної вигоди проєктів та їхній вплив на соціально-економічний

прогрес держав. Усвідомлення потенціалу та шляхів розширення використання зеленого водню в Україні, а також перспективи інтеграції у світовий ринок зеленого водню, обумовили значущість цієї роботи.

Мета статті – комплексне дослідження технологічного потенціалу зеленого водню як базису для сталого розвитку енергетики до 2030 року, аналіз інноваційних методів підвищення ефективності електролізу за допомогою квантових технологій та розробка рекомендацій щодо впровадження водневої інфраструктури в сучасні мегаполіси на прикладі стратегії розвитку Токіо.

Виклад основного матеріалу дослідження. Токіо активно просуває концепцію «Водневого суспільства». У межах форуму це можна представити як:

1. Поєднання ШІ та квантових сенсорів для управління міською енергією без втрат.
2. Презентація японських розробок у сфері водневих паливних елементів для авіації та судноплавства.

Цивілізований світ шукає заміну викопному паливу. Вугілля, нафта, газ – причина енергозалежності та забрудненого довкілля. Країна-терорист росія перетворила енергоносії на гібридну зброю і традиційно використовує викопне паливо для шантажу інших країн та фінансування своєї кривавої машини війни.

Газовий зашморг, закинутий росією на шию нашої країни, коштував нам дуже дорого. Ми знаємо справжню ціну енергії. Наш висновок однозначний: енергетична свобода – це складова національної безпеки.

Заради енергетичної незалежності та кліматичної нейтральності дедалі більше країн переходять на альтернативні джерела енергії та безвуглецеві технології. Уже нікого не дивує використання сонячних та вітрових станцій,

біогазових установок, енергоефективних "розумних" технологій, пасивних будинків.

Світ шукає нові джерела енергії. У центрі уваги – водень. Його вважають паливом майбутнього. Він може замістити традиційні види палива та не спричиняє викидів CO_2. Воднева енергетика повинна стати пріоритетом і для України.

Це перспективна можливість зменшити залежність від викопного палива та декарбонізувати економіку, розвивати експорт та спільні з ЄС водневі проєкти, а головне – стати енергонезалежною та зміцнити свій суверенітет. Це враховують усі дотичні до цього питання урядові структури у своїх стратегіях розвитку.

Зелений водень (H_2) сьогодні розглядається як «священний грааль» енергетики, оскільки він дозволяє декарбонізувати галузі, де електрифікація неможлива (металургія, важкий транспорт, хімічна промисловість). Зелений водень, отриманий електролізом води за допомогою відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), є ключовим компонентом для досягнення вуглецевої нейтральності до 2050 року. Він забезпечує чисту енергію для промисловості, транспорту та опалення, не маючи викидів. Україна має стратегічний потенціал стати експортером водню до ЄС, використовуючи наявну газотранспортну систему та розвиваючи інфраструктуру. Він виготовляється через електроліз, де електроенергія надходить від сонячних, вітрових або гідроелектростанцій.

Першою країною, яка схвалила національну стратегію розвитку водневої енергетики, стала Японія у 2017 році. Там налічуються близько 7 500 автомобілів та 120 автобусів на водневих паливних комірках, близько 160 водневих заправок.

У Німеччині почав працювати перший парк поїздів на водневих паливних елементах. У Нідерландах будують найбільший у Європі завод з

виробництва чистого водню. Існують понад 100 пілотних і демонстраційних проєктів з використання водню в судноплавстві, а в енергетиці оголошено проєкти загальною потенційною потужністю майже 3,5 ГВт до 2030 року.

Китай лідирує за збільшенням потужностей електролізера із сукупною потужністю 220 МВт у 2022 році, ще 750 МВт будує. ЄС схвалив "Водневу стратегію", створив Європейський водневий банк та оголосив перші аукціони на кінець 2023 року.

США анонсували стимули для виробництва чистого водню відповідно до закону про зниження інфляції, оприлюднили амбітну водневу стратегію з планом імплементації і лише у 2023 році інвестували у водневі проєкти 66 млрд дол.

Це лише деякі ключові моменти розвитку галузі. За прогнозами МЕА, очікується зростання виробництва електролізерів і поширення проєктів.

Як розпочалася широкомасштабне вторгнення, в Україні вже неодноразово лунали ідеї стосовно налагодження виробництва водню з використанням екологічно чистих технологій. Цей "зелений" водень добувається завдяки електроенергії, отриманій із відновлюваних джерел. Оскільки зелений водень розглядається як одне з головних видів пального у найближчі роки, для України критично необхідно не просто увійти до цього багатообіцяючого глобального ринку, а й посісти в ньому провідні позиції.

Україна розробляє водневу стратегію до 2050 року, фокусуючись на експорті "зеленого" водню через ГТС до ЄС (проект "Україна-Європа"). Водень має високу енергоємність порівняно з традиційними паливами та є екологічно чистим. Зелений водень використовується в промисловості (виробництво сталі, аміаку), нафтопереробці та як паливо для транспорту.

Необхідність врегулювання правових засад, створення стандартів безпеки, залучення інвестицій та вирішення питань обмеженості водних ресурсів. Дослідження вказують на важливість залучення науки та

гідроенергетики для створення водневої економіки в Україні, що забезпечить сталий розвиток і зменшення вуглецевих викидів.

Україна як ключовий партнер ЄС у виробництві водню відкриває для нас широкий спектр можливостей для співпраці з міжнародними партнерами. Це задекларовано в низці європейських документів.

У 2020 році ЄС презентував "Водневу стратегію" на період до 2050 року, а у 2022 році – план позбуття залежності від російських енергоресурсів REPowerEU. Ці документи роблять акцент на виробництві "зеленого" водню, а Україна визначена пріоритетним партнером завдяки потенціалу відновлюваних джерел енергії.

Згідно з REPowerEU, Євросоюз хоче виробляти 10 млн тонн відновлювального водню і стільки ж імпортувати до 2030 року, щоб замінити природний газ, вугілля та нафту в промисловості і транспорті, які важко декарбонізувати. ЄС також планує створити коридори для імпорту водню. Проєкт Central European Hydrogen Corridor уже пройшов перший етап економічної експертизи. Він об’єднує операторів газотранспортних мереж Німеччини, Чехії, Словаччини та України і забезпечить транспортування українського водню до німецьких споживачів.

З огляду на отримання Україною статусу кандидата на членство в ЄС та вимоги "Європейського зеленого курсу", розвиток водневої економіки має стратегічне значення для країни. Фахівці Міненерго, Держенергоефективності, асоціацій, наукових установ розробили проєкт "Водневої стратегії України".

Свідченням серйозності намірів Євросоюзу щодо співпраці з Україною став меморандум про стратегічне партнерство ЄС та України у сфері відновлюваних газів – водню та біометану. Розроблений Міненерго, Держенергоефективності та Українською водневою радою документ

підписали прем’єр-міністр Денис Шмигаль та президент Єврокомісії Урсула фон дер Ляєн у лютому 2023 року.

Відповідно до положень меморандуму, співпраця буде зосереджена на "зеленому" переході та декарбонізації енергетичних секторів, сприянні виробництву, торгівлі, транспортуванню, зберіганню та використанню біометану, відновлюваного водню, його похідних та інших синтетичних відновлюваних газів.

Україна також може стати невід’ємною частиною реалізації амбітної цілі стратегії "Європейської зеленої угоди" "2·40 ГВт нових потужностей з виробництва водню". Співпраця ЄС з Україною в розбудові відновлюваних джерел енергії та виробництві "зеленого" водню в рамках ініціативи "2·40 ГВт" передбачає будівництво в Україні 10 ГВт електролізерів для випуску "зеленого" водню.

Споживання водню у світовому масштабі сягнуло позначки у 95 мільйонів тонн упродовж 2022 року [4]. Ця цифра підтверджує продовження зростаючого тренду, який тимчасово пригальмувався у 2020 році через пандемію COVID-19 та спричинений нею економічний спад.

Зростання попиту на водень спостерігалося у переважній більшості ключових регіонів, за винятком Європи. У Європейському регіоні використання водню відчутно просіло внаслідок зниження виробничої активності, особливо у секторі хімічної промисловості. Це було спровоковано різким злетом цін на природний газ під час енергетичної кризи, яка розгорнулася слідом за вторгненням російської федерації в Україну. Зокрема, низка підприємств із виробництва добрив змушена була або обмежити обсяги випуску, або повністю законсервувати діяльність на тривалий час, що призвело до падіння споживання водню в Європі майже на 6%.

Водень вважається однією з ключових складових Європейського зеленого курсу (European Green Deal) та запорукою досягнення кліматичної нейтральності Євросоюзом до 2050 року. У 2021 році ЄС ухвалив загальну (охоплюючу) «Водневу стратегію» [6]. Згідно з цією Стратегією, Україні відводилася позиція одного з головних партнерів для забезпечення постачання водню до ЄС, нарівні з Марокко та низкою інших північноафриканських держав, а також кількома країнами-членами самого ЄС. Різні країни Євросоюзу розробили та офіційно затвердили власні водневі стратегії (рис. 1).

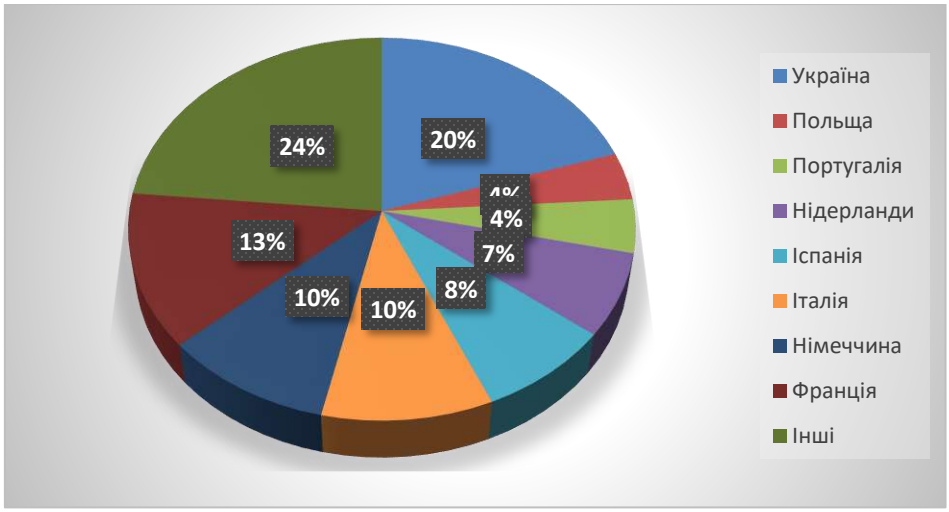


Рис.1. Потужності електролізерів у водневих стратегіях країн ЄС, ГВт [7]

На противагу цьому, Північна Америка та Близький Схід зафіксували суттєве збільшення споживання водню, приблизно на 7% у кожному з цих регіонів, що повністю перекрило європейське зниження. У Китаї зростання було поміркованішим — близько 0,5%, проте країна утримує статус найбільшого світового споживача водню, забезпечуючи майже 30% його загального використання — це більш ніж удвічі перевищує показники Сполучених Штатів, які посідають другу сходинку за обсягами споживання [3]. За прогнозами Міжнародного енергетичного агентства (МЕА),

глобальний попит на водень, вироблений із поточного викопного палива, матиме тенденцію до зниження, тоді як попит на низьковуглецевий водень, навпаки, зростатиме (рис. 2).

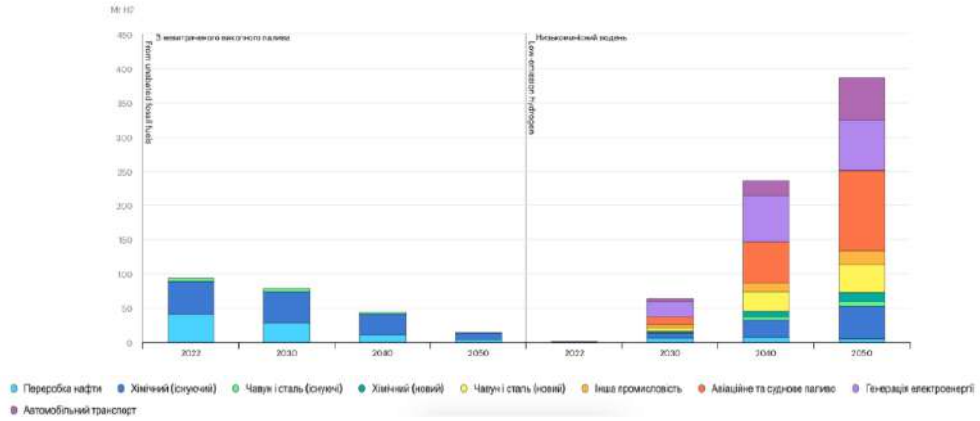


Рис. 2 Глобальний попит на водень у сценарії досягнення чистого нуля, 2022–2050 рр.

Джерело: https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-hydrogen-demand-in-the-net-zero-scenario-2022-2050

Світовий ринок так званого «зеленого» водню демонструє невпинну динаміку зростання. За даними звіту SNS Insider, у 2022 році його обсяг дорівнював 156 мільярдам доларів, а вже до 2030 року очікується збільшення до 385 мільярдів доларів, що відповідає середньорічному темпу приросту у 11,98% [9].

Сьогодні водень активно використовується у нафтопереробній та хімічній промисловості (як ключова сировина), у металургії (як відновник), а також у низці спеціалізованих галузей.

Японія будує «Водневе суспільство» (Hydrogen Society). До 2030 року ключовими проектами є:

- Fukushima Hydrogen Energy Research Field (FH_2R) – один із найбільших у світі заводів із виробництва зеленого водню.
- Заміна дизельного транспорту на паливні елементи.

- Додавання водню до природного газу в міських мережах для зниження викидів.

Висновки. Проведений аналіз підтверджує, що зелений водень є єдиним реальним інструментом повної декарбонізації енергоємних галузей промисловості. Завдяки високій питомій енергоємності та нульовим викидам у точці споживання, він здатен замінити природний газ та вугілля у металургії, хімічній індустрії та на великовантажному транспорті, забезпечуючи перехід до кліматично нейтральної економіки.

Використання квантових технологій та методів штучного інтелекту для розробки нових матеріалів («Квантовий стрибок») дозволяє подолати головний бар'єр — високу вартість обладнання. Моделювання на молекулярному рівні дає змогу створювати доступні каталізатори та адсорбенти, що підвищує загальну рентабельність водневих проектів на 30-40% вже у найближчі роки.

Формування «Водневого суспільства», яке ми спостерігаємо на прикладі Токіо 2026, демонструє важливість синергії між державою, наукою та бізнесом. Створення територіальних водневих кластерів, де виробництво палива розташоване поблизу місць споживання, мінімізує витрати на логістику та підвищує стійкість міської інфраструктури до енергетичних криз.

Екологічна значущість дослідження полягає в доведенні того, що зелений водень не лише знижує викиди парникових газів, а й сприяє розвитку циклічної економіки. Використання побічних продуктів (кисню та тепла) у промислових та комунальних процесах створює замкнені ресурсні цикли, що відповідає глобальним принципам сталого розвитку.

Підсумовуючи, можна стверджувати, що 2026 рік стає рубіжним періодом, коли водень перетворюється з експериментального палива на повноцінний актив глобального енергетичного ринку. Подальші зусилля

мають бути спрямовані на стандартизацію міжнародних норм безпеки та створення глобальних ланцюгів постачання «чистого» водню, що забезпечить стабільне майбутнє для наступних поколінь.

Список використаних джерел

1. Демчук Л. І., Нонік Л. Ю., Войналович І. М. Еколого-техногенна безпека, як роль у формуванні стратегії національної безпеки держави. Сучасні вектори розвитку України: забезпечення сталості та безпеки. Збірник матеріалів II Міжнародної науково-¬практичної конференції (м. Київ, 28 жовтня 2024 року). Чернігів: ГО «Науково-¬освітній інноваційний центр суспільних трансформацій», 2024. DOI: https://doi.org/10.54929/conf_28_10_2024-16-01

2. Chepeliev, M., Diachuk, O., Podolets, R., & Semeniuk, A. (2023). What is the future of nuclear power in Ukraine? The role of war, techno-economic drivers, and safety considerations. Energy Policy, 178, 113612. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113612

3. Кудря, С. О., Рєпкін, О. О., Рубаненко, О. О., Яценко, Л. В., & Шинкаренко, Л. Я. (2022). Етапи розвитку зеленої водневої енергетики України. Відновлювана енергетика, (1(68), 5-16. https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.1(68).5-16

4. Кудря, С., Яценко, Л. В., Шинкаренко, Л. Я., & Ткаленко, М. Д. (2021). Опріснення морської води для отримання зеленого водню. Відновлювана енергетика, (4(67), 6-17. https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.4(67).6-17

5. Sharma, G. D., Verma, M., Taheri, B., Chopra, R., & Parihar, J. S. (2023). Socio-economic aspects of hydrogen energy: An integrative review. Technological Forecasting and Social Change, 192, 122574. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.122574

6. EC (2020) A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe. COM(2020) 301 final. European Commission. URL: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0301.

7. Кудря С.О. (2023). Напрями розвитку вітроводневої енергетики України. In XXIV Міжнароднанауково-практична онлайн-конференція "Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті," 18–19 травня 2023 року. Організатори – НТУ КПІ, ІВЕ НАНУ, Варшавська Політехніка. С.13-19.

8. Arat, H. T., Baltacioglu, M. K., Tanç, S., Sürer, M. G., & Dincer, I. (2020). A perspective on hydrogen energy research, development and innovation activities in Turkey. International Journal of Energy Research, 44(2), 588-593. https://doi.org/10.1002/er.5031

9. BRDO (2022). Зелена відбудова України: перспективи застосування водню в транспорті. URL: https://brdo.com.ua/analytics/zelena-vidbudova-ukrayiny-perspektyvy-zastosuvannya-vodnyu-vtransporti/

10. European Clean Hydrogen Alliance. 2023. Retrieved from. URL: https://single-marketeconomy.ec.europa.eu/industry/strategy/industrial-alliances/european-clean-hydrogen-alliance_en

11. EC (2022) REPowerEU: Joint European Action for more affordable, secure and sustainable energy. COM(2022) 108 final. European Commission. Retrieved from https://eur-lex.europa.eu/legalcontent/EN/TXT/?uri=COM:2022:108:FIN

12. Атлас енергетичного потенціалу України. 2020. Інститут відновлюваної енергетики НАНУ. URL: https://drive.google.com/file/d/11Ay1otLjiqIQelPKxSqfir2rYwGIKxSg/view

13. Україна може стати надійним постачальником зеленого водню до ЄС. URL: https://ukraineinvest.gov.ua/uk/news/06-06-22-2/

14. Нафтогаз підписав меморандум про реалізацію проекту «H_2EU+Store» з виробництва «зеленого» водню в Україні та його постачання до Німеччини. URL: https://www.naftogaz.com/news/green-hydrogen-ukraine-germany

15. Кірейцева Г., Виговська О., Хоменко С. Інтегрована модель залучення зелених інвестицій для декарбонізації залізорудної промисловості України. Науковий вісник Вінницької академії безперервної освіти. Серія «Екологія. Публічне управління та адміністрування». 2025. Вип. 2 (8). С. 10–19. DOI: https://doi.org/10.32782/2786-5681-2025-2.02

16. Хоменко С.В., Кірейцева Г.В. Оцінка стану впровадження міжнародних зобов'язань України зі зміни клімату в законодавче та нормативно-правове забезпечення. Екологічні науки. 2025. Вип. 2(59). С. 228-235. https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.2-59.35

References

1. Demchuk, L. I., Nonik, L. Y., & Voinakovych, I. M. (2024). *Ekoloho-tekhnohenna bezpeka, yak rol u formuvanni stratehii natsionalnoi bezpeky derzhavy* [Ecological and technogenic safety as a role in forming the state's national security strategy]. In *Suchasni vektory rozvytku Ukrainy: zabezpechennia stalosti ta bezpeky* (pp. 16-21). Scientific and Educational Innovation Center of Social Transformations. https://doi.org/10.54929/conf_28_10_2024-16-01

2. Chepeliev, M., Diachuk, O., Podolets, R., & Semeniuk, A. (2023). What is the future of nuclear power in Ukraine? The role of war, techno-economic drivers, and safety considerations. *Energy Policy, 178,* 113612. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113612

3. Kudria, S. O., Riepkin, O. O., Rubanenko, O. O., Yatsenko, L. V., & Shynkarenko, L. Ya. (2022). Etapy rozvytku zelenoi vodnevoi enerhetyky Ukrainy [Stages of development of green hydrogen energy in Ukraine]. *Vidnovliuvana en-*

erhetyka [Renewable Energy], *1*(68), 5–16. https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.1(68).5-16

4. Kudria, S., Yatsenko, L. V., Shynkarenko, L. Ya., & Tkalenko, M. D. (2021). Oprisnennia morskoi vody dlia otrymannia zelenoho vodniu [Desalination of seawater for green hydrogen production]. *Vidnovliuvana enerhetyka [Renewable Energy]*, *4*(67), 6–17. https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.4(67).6-17

5. Sharma, G. D., Verma, M., Taheri, B., Chopra, R., & Parihar, J. S. (2023). Socio-economic aspects of hydrogen energy: An integrative review. *Technological Forecasting and Social Change*, *192*, 122574. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.122574

6. European Commission. (2020). *A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe* (COM(2020) 301 final). https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0301

7. Kudria, S. O. (2023, May 18–19). *Napriamy rozvytku vitrovodnevoi enerhetyky Ukrainy* [Directions of development of wind-hydrogen energy in Ukraine]. XXIV International Scientific and Practical Online Conference "Renewable Energy and Energy Efficiency in the XXI Century", Kyiv, Ukraine.

8. Arat, H. T., Baltacioglu, M. K., Tanç, S., Sürer, M. G., & Dincer, I. (2020). A perspective on hydrogen energy research, development and innovation activities in Turkey. *International Journal of Energy Research*, *44*(2), 588–593. https://doi.org/10.1002/er.5031

9. BRDO. (2022). *Zelena vidbudova Ukrainy: perspektyvy zastosuvannia vodniu v transporti* [Green reconstruction of Ukraine: prospects for the use of hydrogen in transport]. https://brdo.com.ua/analytics/zelena-vidbudova-ukrayiny-perspektyvy-zastosuvannya-vodnyu-vtransporti/

10. European Clean Hydrogen Alliance. (2023). https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/strategy/industrial-alliances/european-clean-hydrogen-alliance_en

11. European Commission. (2022). *REPowerEU: Joint European Action for more affordable, secure and sustainable energy* (COM(2022) 108 final). https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM:2022:108:FIN

12. Institute of Renewable Energy of the NASU. (2020). *Atlas enerhetychnoho potentsialu Ukrainy* [Atlas of energy potential of Ukraine]. https://drive.google.com/file/d/11Ay1otLjiqIQelPKxSqfir2rYwGIKxSg/view

13. UkraineInvest. (2022, June 6). *Ukraine can become a reliable supplier of green hydrogen to the EU*. https://ukraineinvest.gov.ua/uk/news/06-06-22-2/

14. Naftogaz. (2021). *Naftogaz signed a memorandum on the implementation of the "H_2EU+Store" project*. https://www.naftogaz.com/news/green-hydrogen-ukraine-germany

15. Kireitseva, H., Vyhovska, O., & Khomenko, S. (2025). Intehrovana model zaluchennia zelenykh investytsii dlia dekarbonizatsii zalizorudnoi promyslovosti Ukrainy [Integrated model of attracting green investments for decarbonization of the iron ore industry of Ukraine]. *Scientific Bulletin of Vinnytsia Academy of Continuing Education. Series "Ecology. Public Management and Administration", 2*(8), 10–19. https://doi.org/10.32782/2786-5681-2025-2.02

16. Khomenko, S. V., & Kireitseva, H. V. (2025). Otsinka stanu vprovadzhennia mizhnarodnykh zoboviazan Ukrainy zi zminy klimatu v zakonodavche ta normatyvno-pravove zabezpechennia [Assessment of the state of implementation of Ukraine's international climate change obligations into legislative and regulatory support]. *Ekolohichni nauky [Environmental Sciences], 2*(59), 228–235. https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.2-59.35