

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-355-5>
УДК 620.93:662.769.2](045)

ГАВРИСЬ ДМИТРО

Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

<https://orcid.org/0009-0005-9367-0218>

e-mail: dmitro.gavris@icloud.com

БОЙЧЕНКО СЕРГІЙ

Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

<https://orcid.org/0000-0002-2489-4980>

e-mail: boichenko.sergii@iitl.kpi.ua

ВОДЕНЬ – ЕФЕКТИВНИЙ «ІНСТРУМЕНТ» ДОСЯГНЕННЯ ВУГЛЕЦЕВО-НЕЙТРАЛЬНОГО МАЙБУТНЬОГО: ДОСЯГНЕННЯ, ТЕНДЕНЦІЇ, ВИКЛИКИ

У роботі наведено результати аналізу поточного стану та прогнозів розвитку водневих технологій у світі, з акцентом на електролізне виробництво водню. Вивчено міжнародний досвід, а також регіональні відмінності в імплементації водневої енергетики. Визначено основні міжнародні ініціативи та стратегічні проєкти, що спрямовані на розвиток інфраструктури та масштабування електролізерних потужностей. Дане дослідження є важливим науковим і практичним завданням, що дозволить не лише сформувати комплексне уявлення про поточні досягнення, але й виявити основні бар'єри на шляху до сталого водневого майбутнього.

Ключові слова: водень, електроліз, енергетичний перехід, відновлювані джерела енергії, декарбонізація.

DMYTRO HAVRYS, BOICHENKO SERGI

National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

HYDROGEN – AN EFFECTIVE “TOOL” FOR ACHIEVING A CARBON-NEUTRAL FUTURE: ACHIEVEMENTS, TRENDS, CHALLENGES

The effective development of hydrogen technologies is an important aspect in the context of the global energy transition. Forecasts for the future of hydrogen as an energy source demonstrate its potential to become an important element in the fight against climate change, in particular due to its ability to be a clean, versatile and renewable energy source. However, achieving this goal requires addressing a number of technical, economic and infrastructural challenges.

First and foremost, it is important to integrate hydrogen technologies into existing energy systems to ensure efficient production, storage and transportation of hydrogen. The development of this technology depends on many factors, including the availability of renewable energy sources, as well as the technical characteristics of the electrolyzers and infrastructure. Currently, the greatest progress is being made in regions such as Europe, Asia, North America and Australia, where hydrogen production and use projects are being actively implemented. Particular attention is drawn to initiatives that promote the development of hydrogen infrastructure in Ukraine, where hydrogen can become an important element for the transition to a more sustainable energy model.

This publication contains a technical overview of electrolyzers, a classic review of the produced review, and international initiatives and projects that contribute to the development of hydrogen technologies and its integration into energy networks.

Analysis of the international dynamics of hydrogen energy development confirms its priority tendency and demonstrates its strategic importance in achieving the goals of decarbonization, energy security and sustainable development. Ukraine, given its natural resources, infrastructure and strategic location, has every chance of becoming one of the key players in the European hydrogen market.

This investigation is an important scientific and practical result that will allow not only to form a comprehensive picture of current achievements, but also to identify the main barriers to a sustainable hydrogen future and to form an understanding of the prospects for the implementation of hydrogen technologies.

Keywords: hydrogen, electrolysis, energy transition, renewable energy sources, decarbonization.

Стаття надійшла до редакції / Received 01.05.2025

Прийнята до друку / Accepted 26.05.2025

Постановка проблеми

У сучасних умовах глобального потепління та вичерпності традиційних джерел енергії все більшої актуальності набуває пошук екологічно чистих і відновлюваних енергетичних ресурсів (ВЕР). Одним із найбільш перспективних напрямів у цьому контексті є використання водню як універсального енергетичного носія. Водень розглядається не лише як альтернатива викопному паливу, а й як ключовий «інструмент» для досягнення вуглецевої нейтральності у провідних країнах світу.

Однак, впровадження водневої енергетики супроводжується низкою викликів, зокрема – високою енергоємністю процесів виробництва, складністю транспортування і зберігання, потребою у розвитку відповідної інфраструктури, а також необхідністю стандартизації технологій. Окрім того, значна частина сучасних методів одержання водню залишається пов'язаною з викидами парникових газів, що суперечить основним цілям енергетичного переходу.

У зв'язку з цим надзвичайно важливим є системне дослідження поточного стану глобальних проєктів, пов'язаних із виробництвом водню, їх ефективності, джерел живлення (зокрема ВЕР), а також аналіз тенденцій розвитку й перспектив переходу до «зеленого» водню. Особлива увага має приділятися міжнародним ініціативам, інвестиційним програмам та державній політиці різних країн, що визначають швидкість та масштаб впровадження водневих технологій.

Аналіз досліджень та публікацій

У численних дослідженнях [1–15], присвячених енергетичному переходу, водень розглядається як один із ключових «інструментів» досягнення вуглецевої нейтральності. Зокрема, в роботі [13] наведено дані про потенціал ВЕР та роль водню у декарбонізації енергосистем. У доповіді наголошується, що використання зеленого водню, виробленого електролізом з використанням енергії від ВЕР, може суттєво скоротити викиди CO₂ у важко декарбонізованих секторах, зокрема, у транспорті, промисловості та виробництві електроенергії. Окрім того, численні публікації [4–15], акцентують увагу на важливості міжнародної співпраці для масштабування водневої інфраструктури, зниження витрат на електролізери та створення сприятливих регуляторних умов. Це особливо є актуальним для економіки України, де інфраструктура водневих технологій знаходиться у «стартових» умовах. Водночас, у науковій літературі окреслено низку технічних і економічних викликів, пов'язаних із широким впровадженням водневих технологій: низька ефективність процесів виробництва і зберігання, обмежена інфраструктура, а також необхідність удосконалення стандартів безпеки.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є аналіз сучасного стану та перспектив розвитку водневої енергетики в контексті глобального енергетичного переходу, зокрема огляду технології електролізу та водню як кінцевого продукту, дослідження міжнародних ініціатив з виробництва водню, оцінка поточного застосування водню в різних секторах економіки, а також виявлення основних викликів і тенденцій, пов'язаних із впровадженням водневих технологій.

Завдання роботи – комплексний аналіз сучасного стану водневої енергетики з акцентом на технології виробництва та міжнародного досвіду впровадження водневих стратегій, а також визначення перспектив подальшого розвитку водневих технологій як інструменту енергетичної трансформації та декарбонізації економіки.

Об'єкт дослідження – аналіз сучасних досягнень, тенденцій розвитку водневої енергетики як складова сучасної енергетичної системи в контексті енергетичного переходу.

Предмет дослідження – властивості водню, технології виробництва, класифікація, а також міжнародні стратегії впровадження водневої енергетики і перспективи її розвитку в контексті глобальної енергетичної трансформації.

Гіпотезою цієї праці є: широкомасштабне впровадження водневої енергетики, зокрема «зеленого» водню, може стати ключовим чинником у досягненні цілей декарбонізації, забезпеченні енергетичної безпеки та формуванні сталого енергетичного майбутнього за умови подолання технологічних, економічних та інфраструктурних бар'єрів.

Виклад основного матеріалу

Наразі поширеними типами установок для електролізу води, що використовуються для виробництва водню, є лужні водні електролізери (AWEs – alkaline water electrolyzers), мембранні електролізери з полімерним електролітом (PEMEs – polymer electrolyte membrane electrolyzers) та електролізери з твердими оксидами (SOEs – solid oxide electrolyzers) [4,13]. Серед них AWE мають довшу історію розвитку та зрілі технології і домінують на ринку електролізерів, тоді як SOE мають вищу робочу температуру, менше енергоспоживання та вищу ефективність під час електролізу. PEME швидко розвиваються в останні роки і використовують протонобмінні мембрани замість діафрагм та електролітів у традиційних електролізерах [4,5]. Три основні типи електролізерів (рис. 1) та їх характеристики наведено в табл. 1.

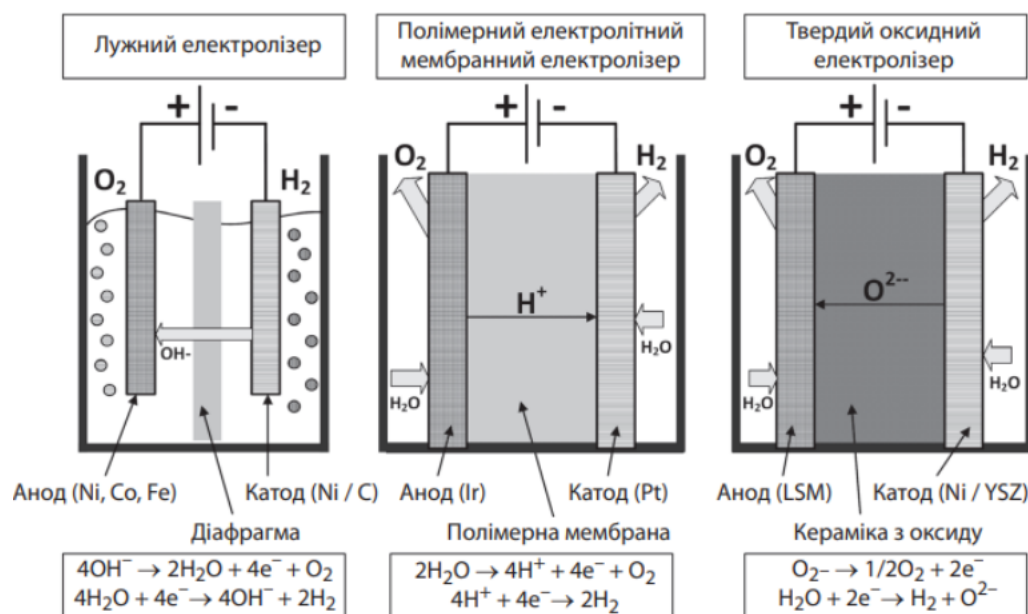


Рис. 1. Базові типи електролізерів [4,5]

Вплив виробництва водню на довкілля залежить від використовуваних технологій і сировини. Кожен метод має власний рівень викидів парникових газів, що підкреслює необхідність переходу до чистіших технологій (табл. 2). Загальносвітова структура виробництва водню на сьогодні розподіляється за трьома основними джерелами: 78% припадає на переробку природного газу та нафти, 18% – переробка вугілля, 4% забезпечується використанням ВЕР та електролізу води.

Таблиця 2 узагальнює методи виробництва водню за кольорами, умовно акцентуючи на важливості екологічно сталих підходів [4, 13]. Проте слід зауважити, що кольорова класифікація може бути оманливою. Наприклад, "зелений" водень не завжди має менший вуглецевий слід, ніж "блакитний", особливо якщо останній супроводжується ефективним уловлюванням вуглецю. До того ж "зелений" водень, отриманий з біомаси, може супроводжуватись викидами CH_4 , SO_x , NO_x і CO_2 . Таким чином, оцінка екологічної доцільності повинна враховувати не лише тип виробництва, а й конкретні умови його реалізації.

Таблиця 1

Основні параметри технологій електролізерів [4,5]

Найменування параметру	AWE (лужний електролізер)	PEME (протонно- обмінна мембрана)	SOE (твердий оксидний електролізер)
Зрілість технології	Масова комерціалізація	Комерціалізація	Стадія дослідження
Температура, °C	60–80	50–80	600–1000
Тиск, бар	10–30	20–50	1–15
Щільність струму, А/см ²	< 0.45	1.0–2.0	0.3–1.0
Одинична електрична потужність, МВт	6	2	0.15
Електрична ефективність, %	62–82	67–82	81–86
Споживання енергії системою, кВт·год/м ³	4.2–4.8	4.4–5.0	2.5–3.5
Виробнича площа, м ²	3–3.6	< 0.13	< 0.06
Швидкість виробництва водню, м ³ ·год ⁻¹	1400	400	< 10
Термін служби реактора, тис. год	55–120	60–100	8–20
Термін служби системи, років	20–30	10–20	-
Чистота виробленого водню, %	> 99.8	99.99	-
Час холодного старту, хв	60–120	5–10	> 60
Час гарячого старту, с	60–300	< 10	900
Інвестиційні витрати, дол./кВт	800–1500	400–2100	> 2000

Таблиця 2

Порівняльний огляд різних процесів виробництва водню [6]

Hydrogen Produced (With Color Code)	Production Process	Feedstock Source	Environmental Impact (GHG emission)
Green H ₂	Electrolysis	Renewable energy sources (Hydro/ Solar/ Wind/ Tidal)	Minimal. Water is the by product
Yellow H ₂		Grid electricity	Medium
Pink H ₂		Nuclear Energy	Minimal
Black H ₂	Gasification (no CCUS)	Black Coal	High
Brown H ₂		Brown Coal (Lignite)	High
Grey H ₂	SMR	Natural Gas (CH ₄)	Medium
Blue H ₂	SMR+CCUS Gasification + CCUS	NG Coal	Low
Turquoise H ₂	Methane Pyrolysis	Natural Gas (CH ₄)	Solid Carbon (by product)/ No CO ₂ emission
White H ₂	Naturally occurring hydrogen	Geological formations, industrial byproducts	
Gold H ₂	Biological fermentation in depleted wells	Residual hydrocarbons	Low

"Зелений" водень, отриманий електролізом, що працює на відновлюваній енергії (гідроенергія, сонячна, вітрова або припливна), є найбільш екологічним варіантом, оскільки він практично не генерує викидів, а єдиним побічним продуктом є вода.

"Жовтий" водень, також отриманий методом електролізу, але з використанням електроенергії з мережі, має середній вплив на довкілля залежно від енергетичного балансу мережі.

"Рожевий" водень використовує ядерну енергію для електролізу, зберігаючи низькі викиди, але з урахуванням аспектів поводження з ядерними відходами.

Натомість "сірий", "коричневий" і "чорний" водень виробляються з викопного палива без технологій уловлювання та зберігання вуглецю. "Коричневий" і "чорний" водень отримуються газифікацією вугілля (коричневий) або інших викопних видів палива (чорний) без фільтрації. "Сірий" водень, отриманий паровим реформінгом метану (природного газу), також спричиняє значні викиди CO₂, хоча залишається широко поширеним методом виробництва. Ці методи пов'язані зі значними викидами CO₂, що суттєво сприяє парниковому ефекту, роблячи їх менш екологічно прийнятними, де "сірий" водень є найменш забруднюючим, а "чорний" – найбільш.

"Блакитний" водень отримують із природного газу, але з використанням фільтрації для зниження викидів. Хоча він сприяє скороченню прямих викидів CO₂ у порівнянні з іншими методами на основі викопного палива, його екологічність значною мірою залежить від ефективності та надійності фільтруючих технологій.

"Бірюзовий" водень пропонує інноваційний підхід, за якого під час піролізу метану утворюється твердий вуглець замість CO₂, що створює цінний промисловий побічний продукт без викидів CO₂.

"Білий" водень природним чином зустрічається в геологічних формаціях і є побічним продуктом деяких промислових процесів, тоді як "золотий" водень отримують ферментацією мікроорганізмами у виснажених свердловинах, що забезпечує низьковуглецевий або потенційно нейтральний процес виробництва.

Цей широкий спектр методів виробництва водню підкреслює критичну необхідність переходу до технологій, заснованих на ВЕР. Це важливо для повного розкриття потенціалу водню як чистого та сталого енергоносія майбутнього. Разом з тим показує, що використання надлишкової електроенергії для виробництва водню має як технічні, так і економічні переваги. Технічно це зменшує втрати електроенергії у періоди надлишкового виробництва, а економічно – створює додаткову вартість з інакше змарнованої електроенергії, знижуючи рівневу вартість виробництва водню у перспективі [4–6].

Водень розглядається як один із ключових чинників для досягнення низьковуглецевого майбутнього, оскільки він здатен забезпечити глибоку декарбонізацію енергетики, транспорту та промисловості. Водночас розвиток водневої енергетики значною мірою залежить від національних пріоритетів, доступних ресурсів і технологічної готовності країн. У кожному регіоні формуються власні підходи до виробництва, зберігання та використання водню, що зумовлює різноманітність стратегічних рішень і проєктів. Вода може бути перетворена у водень і кисень за допомогою електролізера та електроенергії. Електроліз відіграє центральну роль у розгортанні відновлюваного водню.

У **Німеччині**, наприклад, оператори Amprion і OGE розробили інвестиційний проєкт для електролізера на 100 МВт і водневого трубопроводу на північному заході країни, з потенційним запуском у найближчі роки. Вартість – €150 млн. Біля хімічного підприємства планується вітровий парк на 40 МВт з електролізерами, сховищем на 50 млрд м³ та водневим трубопроводом. Потужність може зрости до 200 МВт до 2030 року. Shell у 2020 році планує запуск 10-МВт РЕМ-електролізера на НПЗ у Весселінгу. У Майнці електролізер на 6 МВт працює з 2017 року.

У 2019 уряд Німеччини схвалив 11 демонстраційних проєктів, серед яких:

- CCU P2C Salzbergen – виробництво синтетичного метану
- DOW Green MeOH – виробництво метанолу
- Element eins – електролізер потужністю 100 МВт
- EnergieparkBL – електролізер потужністю 35 МВт
- GreenHydroChem – електролізер потужністю 50 МВт
- H₂ Stahl – упорскування водню в доменну піч
- H₂ Whylen, RefLa, REWest – електролізер потужністю 10 МВт кожен
- HydroHub Fenne – електролізер потужністю 17,5 МВт
- Norddeutsches reallabor – електролізер потужністю 77 МВт.

Європа, Азія, Австралія, Північна Америка та Китай активно розвивають великомасштабні проєкти з виробництва водню, переважно за допомогою електролізу на основі ВЕР. Усі ці ініціативи спрямовані на декарбонізацію промисловості, транспорту та енергосистем, демонструючи високий глобальний імпульс до масштабування технологій.

У **Нідерландах** у порту Роттердам розглядається проєкт будівництва електролізера потужністю 2 ГВт, що має стати одним із найбільших у Європі. Водночас у провінції Гронінген (Делфзейл) заплановано електролізну установку потужністю 20 МВт з можливим розширенням до 60 МВт. Цей завод вироблятиме водень для синтезу метанолу та синтетичного авіаційного палива.

У **Лінці (Австрія)** Siemens постачає РЕМ-електролізер потужністю 6 МВт, що фінансується Об'єднаним підприємством з паливних елементів і водню.

У **Норвегії** реалізується пілотний проєкт, орієнтований на синтез рідкого палива з водню та CO₂. Завод планується масштабувати до виробництва 8 тисяч тонн синтетичної нафти на рік за умови досягнення потужності 20 МВт.

У **Японії** компанія Toshiba у місті Фукусіма замовила електролізну установку на 10 МВт, що виробляє до 900 тонн водню щорічно на базі сонячної електростанції потужністю 20 МВт. Ще один проєкт, відомий як Yamanashi Fuel Cell Valley, передбачає поєднання PEM-електролізера на 1,5 МВт із сонячною електростанцією на 21 МВт.

В **Австралії** в регіоні Пілбара створюється інфраструктура для виробництва водню на основі сонячної та вітрової енергії загальною потужністю до 15 ГВт, орієнтована як на внутрішні потреби гірничодобувної промисловості, так і на експорт. У місті Crystal Brook компанія Neoen розробляє Hydrogen Hub, що включає електролізер на 50 МВт. У Порт-Лінкольні (Південна Австралія) передбачено будівництво 30-мегаватного електролізера в поєднанні з аміачним заводом потужністю 50 тонн на добу.

Франція у межах проєкту Les Hauts de France планується встановлення п'яти електролізерних установок по 100 МВт кожна протягом п'яти років. Перший із них, постачений компанією HydrogenPro, мав бути введений в експлуатацію до кінця 2021 р. У місті Дюнкерк реалізується ініціатива з додавання водню до природного газу з метою декарбонізації енергоспоживання в побутовому та комунальному секторах.

У **Великій Британії** проєкт *Gigastack* (ITM Power, Ørsted, Element Energy) демонструє великомасштабний PEM-електроліз для виробництва недорогого зеленого водню. Створюється новий завод з виробництва модулів потужністю 5 МВт. Буде створено новий напівавтоматизований виробничий комплекс із річною потужністю електролізерів до 1 ГВт, що буде орієнтований на реалізацію масштабних проєктів (від 100 МВт і більше) із використанням кількох модулів потужністю 5 МВт. Використання PEM-електролізерів дозволить ефективно інтегрувати їх із великими відновлюваними енергетичними установками гігаватного рівня.

У **Канаді** компанія Air Liquide побудує найбільший у світі PEM-електролізер потужністю 20 МВт, що працюватиме на гідроенергії. Крім того, Renewable Hydrogen Canada (RH2C) планує виробництво H₂ із вітрової та гідроенергії, зокрема для інжекції до газової мережі Ванкувера. Очікується, що впровадження 120 МВт електролізу дозволить зменшити споживання природного газу в регіоні на 10%.

У **США** Міністерство енергетики здійснює кілька програм з розвитку водневих технологій. Офіс енергоефективності та відновлюваної енергетики має окрему програму, присвячену водню з ВЕР, з акцентом на електроліз, що включає чітко визначені цілі щодо вартості та ефективності.

У **Китаї** Найважливішими вітчизняними виробниками є компанії Tianjin Mainland Hydrogen Equipment Co., Ltd. (THE) та Beijing CEI Technology Co., Ltd. Компанія THE є провідним світовим постачальником лужних електролізерів і з 1994 року поставила понад 400 виробничих установок, з одиницями потужністю до 1000 нормальних кубічних метрів на годину (THE Co., Ltd., 2019). Зокрема, THE постачає електролізери для проєктів у Європі (включно з Францією та Норвегією) у співпраці з норвезькою HydrogenPro [6].

В **Україні** компанія «Водень України» реалізує низку стратегічних проєктів, спрямованих на розвиток водневої енергетики в Україні, зокрема в Одеській області та на Закарпатті. У травні 2024 р. компанія спільно з AB5 Consulting отримала грант у рамках конкурсу InnovateUkraine, організованого Посольством Великої Британії у Києві. Передбачається будівництво заводу з початковою електролізною потужністю 100 МВт, а також сонячної та вітрової електростанцій потужністю 120 МВт і 80 МВт відповідно. У межах цього ж проєкту передбачено спорудження водневого трубопроводу Рені-Галац для експорту українського водню на європейські ринки.

На Закарпатті компанія працює над створенням водневої долини, орієнтованої на виробництво та зберігання водню з ВЕР. Цей проєкт має важливе значення для енергетичної безпеки регіону та є частиною Центральноєвропейського водневого коридору, що має з'єднати Україну з Німеччиною через Словаччину та Чехію [8].

Ці приклади свідчать про значний інтерес до водню у всьому світі. Існує ще багато пілотних і ранньокommerційних проєктів, що демонструють чітку тенденцію до збільшення розмірів електролізерів та технологічних удосконалень. Водень відіграватиме важливу роль у зменшенні викидів у найближчі десятиліття. IRENA прогнозує, що частка водню у загальному кінцевому енергоспоживанні становитиме 6% до 2050 р., тоді як за оцінками Hydrogen Council, цей показник може досягти 18% [8, 9].

Наразі щорічно виробляється близько 120 мільйонів тонн водню, з яких дві третини є чистим воднем, а одна третина – у суміші з іншими газами. Це еквівалентно 14,4 ексаджоулям (за даними IEA), або близько 4% глобального кінцевого енергоспоживання та неенергетичного використання, згідно зі статистикою Міжнародного енергетичного агентства (IEA). Приблизно 95% всього водню виробляється з природного газу та вугілля. Близько 5% отримується як побічний продукт виробництва хлору електролізом. У металургійній промисловості газ коксових печей також містить значну частку водню, деяка кількість якого відновлюється. Наразі виробництво водню з ВЕР є обмеженим, проте ця ситуація може змінитися найближчим часом.

Переважає більшість водню сьогодні виробляється та використовується безпосередньо на місці в промисловості. Основними напрямками його використання є виробництво аміаку та нафтопереробка, що разом становлять дві третини загального споживання водню. Аміак використовується як азотне добриво та для виробництва інших хімічних сполук. На нафтопереробних заводах водень додається до важкої нафти для

отримання моторного палива. Хоча сьогоднішнє використання водню має обмежене пряме значення для енергетичного переходу, воно дозволило накопичити значний досвід у поводженні з воднем. Водневі трубопровідні системи, що простягаються на сотні кілометрів, працюють у різних країнах і регіонах десятиліттями без серйозних інцидентів. Аналогічно, водень вже давно транспортується у спеціалізованих вантажівках.

Окрім цих традиційних застосувань, що існують десятиліттями, використання водню залишається досить скромним. Важливість водню для енергетичного переходу має базуватися на нових сферах його застосування, а його постачання має бути декарбонізованим [8].

Багато країн-експортерів нафти мають чудові відновлювані енергетичні ресурси, що у поєднанні можуть забезпечити дуже дешеву електроенергію разом із високими коефіцієнтами використання потужностей. Для країн-експортерів нафти відновлюваний водень може стати можливістю для переходу на паливо з нижчим вмістом вуглецю та диверсифікації економіки. Одним із перших кроків є використання відновлюваного водню для гідрокрекінгу та десульфуризації в нафтопереробних процесах як перехідний етап до e-fuels.

Виробництво водню з відновлюваної електроенергії набирає обертів у всьому світі. Австралія вперше експортувала невелику кількість "зеленого" водню, виробленого з відновлюваної енергії, до великої енергетичної компанії в Японії у 2019 році. Японія є одним із основних напрямків експорту водню, і країни включають її до своїх стратегічних планів. Японія вже уклала партнерства з Австралією, Чилі, Норвегією та Саудівською Аравією для імпорту водню.

Австралія: Південна Австралія, завдяки значному потенціалу генерації відновлюваної енергії та обмежене з'єднання з рештою країни, є ідеальним місцем для виробництва водню із сонячної та вітрової енергії. Це сприяє більш ефективній інтеграції сонячної та вітрової енергії в енергосистему. У регіонах із низьким попитом на електроенергію та високим потенціалом виробництва відновлюваної енергії можуть створюватися великомасштабні водневі проекти.

Чилі активно розробляє стратегію експорту водню до країн, включаючи Японію та Республіку Корею. Основою цієї стратегії є використання одного з найкращих у світі сонячних ресурсів – пустелі Атакама, що має понад 3000 годин сонячного випромінювання на рік і менше 2 мм опадів, що забезпечує низьку вартість та високу ефективність виробництва відновлюваної енергії. Використання лише незначної частини сонячного потенціалу Атаками дозволить виробляти понад 450 000 тонн водню щорічно, відкриваючи великі можливості для Чилі як експортера «зеленого» водню.

Норвегія пропонує використання гідроенергетики (або вітрової енергії) у поєднанні з високотемпературним електролізом. Водень потім буде скраплений для транспортування до Японії.

Саудівська Аравія планує виробляти водень, поєднуючи сонячну та вітрову енергію, що дозволить підвищити коефіцієнт використання потужності без значного зростання вартості електроенергії. Значну роль може відігравати і CSP, зокрема у використанні вискоєфективного електролізу, такого як SOEC. Країна визначила аміак як основний засіб транспортування водню, враховуючи міжнародний досвід і перспективи відмови від викопного палива. Наразі енергетичний сектор Саудівської Аравії споживає близько 1 млн барелів нафти щодня. Перехід на відновлювані джерела та водень дозволить скоротити споживання нафти до 141 млн барелів нафтового еквівалента, що становитиме лише 19% від загального споживання викопного палива [8].

Окрім вищезгаданих прикладів впровадження водневих технологій у країнах Азії та Австралії, важливу роль у розвитку водневої економіки відіграє ЄС. У 2020 році Європейська комісія представила «Стратегію водню для кліматично нейтральної Європи» (*A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe*), в якій зазначено, що до 2030 р. планується встановити не менше 40 ГВт електролізерних потужностей для виробництва зеленого водню в ЄС [11].

Водень розглядається як ключовий елемент для декарбонізації промисловості, транспорту та енергетики. Наразі інвестуються значні кошти у створення водневої інфраструктури, зокрема через проєкт H2U, що передбачає транспортування зеленого водню з України до Європи [9]. Водень визнають ключовим енергетичним рішенням для досягнення глобальної стійкості, але успіх прийняття водню залежить від вирішення кількох технічних та економічних проблем, що згруповані у табл. 3, що підкреслює основні перешкоди, потенційні рішення та стратегічні напрями розвитку водню.

Таким чином, розвиток водневої економіки має значні передумови як на глобальному, так і на регіональному рівні. Основними рушіями виступають: декарбонізація енергетики та транспорту, стратегічні ініціативи урядів, зростання інвестицій у водневу інфраструктуру та формування міжнародних партнерств. Водночас реалізація водневого потенціалу залежить від подолання низки викликів – зниження вартості технологій, розвитку стандартів і нормативної бази, а також забезпечення масштабної інтеграції у національні енергетичні системи.

Висновки та перспективи подальших розвідок

Аналіз і феноменологічний опис міжнародного досвіду з виробництва водню за допомогою електролізу свідчить про те, що воднева енергетика поступово переходить із фази досліджень і пілотних розробок до стадії масштабного впровадження. Ключові регіони світу – Європейський Союз (ЄС), країни Азії (зокрема Японія, Південна Корея та Китай), Північна Америка, Австралія та країни Близького Сходу –

активно розробляють національні стратегії, виділяють значне фінансування на розвиток водневих технологій та стимулюють міжгалузеву співпрацю.

Підтверджено, що попит на водень продовжує зростати, а водневі технології вже впроваджуються у транспорті, промисловості, електроенергетиці та житлово-комунальному господарстві. Світова статистика підтверджує швидке зростання кількості електролізерів, обсягів інвестицій і зацікавленості бізнесу. Водночас, присутня низка викликів, пов'язаних з економічною доцільністю, розвитком інфраструктури та технічним регулюванням.

Таблиця 3

Систематизація викликів, рішень та перспектив розвитку водневих технологій [12,13,14]

Зона виклику	Опис	Потенційне рішення	Майбутні перспективи
Інфраструктурні прогалини	Обмежена наявність трубопроводів, заправних станцій та транспортних суден ускладнює виробництво, зберігання та розподіл водню.	Прийняття публічно-приватних партнерств для інвестицій, встановлення стандартизованих регулювань та сприяння глобальній співпраці для планування інфраструктури.	Розвиток надійної та взаємопов'язаної глобальної водневої інфраструктури для задоволення майбутніх енергетичних потреб і підтримки широкого впровадження.
Високі витрати	Високі витрати на виробництво, зберігання та розподіл водню через потребу в передових технологіях та інфраструктурі.	Контроль економії на масштабах, впровадження передових технологій для підвищення ефективності та реалізація підтримувальних політик і фінансових стимулів.	Зниження загальних витрат, що зробить водневі рішення економічно вигідними та конкурентоспроможними на енергетичних ринках.
Ефективність виробництва	Поточні методи виробництва часто залежать від викопних видів палива, що обмежує сталість і масштабованість.	Масштабування електролізу з використанням відновлювальних джерел енергії, розробка передових каталізаторів та дослідження інновацій.	Розширення виробництва зеленого водню, зменшення залежності від викопних видів палива та сприяння зусиллям по декарбонізації.
Транспортні проблеми	Безпечне та ефективне транспортування водню стикається з бар'єрами через обмеження існуючих методів зберігання та транспортних контейнерів.	Інвестиції в передові матеріали для легких контейнерів, покращення криогенного транспортування водню та розробка технологій носіїв.	Покращення безпеки, ефективності та масштабованості транспортування водню, що відкриває шлях до ширшого використання в енергетичних додатках.
Обмеження зберігання	Зберігання вимагає передових матеріалів для вирішення проблем енергетичної щільності, безпеки та умов навколишнього середовища.	Розробка передових легких систем зберігання та оптимізація твердотільних методів для різноманітних застосувань.	Ефективні рішення для зберігання для різних промислових, комерційних та енергетичних секторів з покращеною енергетичною щільністю та стандартами безпеки.
Відсутність співпраці	Розрізнені зусилля в дослідженнях уповільнюють інновації та сповільнюють прогрес	Сприяння спільним дослідженням та ініціативам розвитку між галузями та країнами для обміну знаннями.	Швидкий прогрес у технологіях виробництва, зберігання та транспортування водню.
Потреба в пілотному тестуванні	Технології потребують реальної перевірки для оцінки доцільності та масштабованості для широкого впровадження.	Впровадження великих пілотних проектів і демонстраційних програм для вдосконалення технологій і вирішення операційних проблем.	Доведена доцільність і готовність водневих технологій до комерційного та промислового впровадження.
Бар'єри розвитку ринку	Обмежене впровадження на ринку через високу вартість, недостатню обізнаність та відсутність споживчого попиту.	Сприяння інноваційним бізнес-моделям, підтримка стартапів та запуск публічних ініціатив для підвищення обізнаності.	Збільшення конкурентоспроможності ринку та довіри споживачів, що сприятиме процвітанню водневої економіки.
Проблеми стандартизації	Відсутність глобальних стандартів впливає на надійність та безпеку водневих технологій.	Створення міжнародно-визнаних стандартів та сертифікаційних схем для забезпечення єдності та надійності на всьому ланцюзі водневих технологій.	Гармонізовані глобальні стандарти, що сприяють безпечному та надійному впровадженню водневих технологій у різних галузях.
Робоча сила та знання	Обмежений технічний досвід та кваліфікована робоча сила створюють	Обмін найкращими практиками, проведення тренінгів та підвищення	Розвиток кваліфікованої глобальної робочої сили, здатної працювати з передовими

	виклик для розвитку водневого сектора.	кваліфікації через міжнародні співпраці та партнерства.	водневими технологіями та стимулювати інновації.
Відповідність екологічним вимогам	Технології водню повинні відповідати кліматичним та енергетичним цілям для досягнення сталості.	Інтеграція водневих стратегій із ширшими кліматичними ініціативами та впровадження низьковуглецевих виробничих технологій.	Прискорення переходу до сталого енергетичного майбутнього, де водень зменшує викиди парникових газів і залежність від викопних видів палива.

Таким чином, аналіз міжнародної динаміки розвитку водневої енергетики засвідчує її пріоритетну тенденційність та демонструє стратегічну важливість у досягненні цілей декарбонізації, енергетичної безпеки та сталого розвитку. Україна, з огляду на свої природні ресурси, інфраструктуру та стратегічне розташування, має всі шанси стати одним із ключових гравців на європейському водневому ринку.

Дане дослідження є важливим науковим і практичним результатом, що дозволить не лише сформулювати комплексне уявлення про поточні досягнення, але й виявити основні бар'єри на шляху до сталого водневого майбутнього та сформулювати розуміння перспектив імплементації водневих технологій.

Література

1. Бойченко, С. В., & Калмикова, Н. Г. (2020). Бенчмаркінг ефективності акумулювання та зберігання водню як моторного палива. *Наукоємні технології*, (4), 496–512.
2. Boichenko, S., Chen, L., Korovushkin, V., & Biliakovych, O. (2025). PEST- and SNW-analysis of the use of liquid hydrogen as a motor fuel in aviation. *System Research in Energy*, (1(81)), 61–73. <https://doi.org/10.15407/srenergy2025.01.061>.
3. Boichenko, S., & Chen, L. (2024). Comparative analysis of hydrogen production, accumulation, distribution, and storage systems. *System Research in Energy*, (3(79)), 13–20. <https://doi.org/10.15407/srenergy2024.03.013>.
4. Ташеев, Ю. В., Войтко, С. В., Трофименко, О. О., Рєпкін, О. О., & Кудря, Т. С. (2020). Глобальні тенденції розвитку водневих технологій у промисловості. *Бізнес Інформ*, (8), 103–114. <https://doi.org/10.32983/2222-4459-2020-8-103-114>.
5. Dai, S., Shen, P., Deng, W., & Yu, Q. (2024). Hydrogen energy in electrical power systems: A review and future outlook. *Research Gate*. https://www.researchgate.net/publication/383444047_Hydrogen_Energy_in_Electrical_Power_Systems_A_Review_and_Future_Outlook.
6. Boichenko, S., & Tarasiuk, O. (2022). World practices and prospects of using hydrogen as a motor fuel. In 2022 IEEE 8th International Conference on Energy Smart Systems (ESS) (pp. 01–06). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ESS57819.2022.9969276>.
7. Kosturjak, A., Dey, T., Young, M., & Whetton, S. (2019). Advancing hydrogen: Learning from 19 plans to advance hydrogen from across the globe. *Future Fuels CRC*.
8. International Renewable Energy Agency (IRENA). (2019). Hydrogen: A renewable energy perspective (Report for the 2nd Hydrogen Energy Ministerial Meeting, Tokyo, Japan). https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA_Hydrogen_2019.pdf.
9. Воднева долина. (2025). H2U. Retrieved April 27, 2025, from <https://h2u.ua/ua/proekty/>.
10. Serhiy Pyshyev, Yuriy Lypko, Yuriy Demchuk, Oleh Kukhar, Bohdan Korchak, Iryna Pochapska, Ihor Zhytnetskyi. Characteristics and applications of waste tire pyrolysis products: A review // *Chemistry & Chemical Technology*. – 2024. – Vol. 8. – № 2. – P. 244–257. <https://doi.org/10.23939/chcht18.02.244>
11. European Commission. (2020). A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0301>.
12. Boichenko, S., Danilin, O., Shkilniuk, I., Yakovlieva, A., Khotian, A., Pavlovskyi, M., Lysak, R., Shamanskyi, S., Kryuchkov, A., & Tarasiuk, O. (2023). Substantiating the expediency of using hydrogen fuel cells in electricity generation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(8(123)), 17–29. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.280046>.
13. Rasul, M. G., Hazrat, M. A., Sattar, M. A., Jahirul, M. I., & Shearer, M. J. (2022). The future of hydrogen: Challenges on production, storage and applications. *Energy Policy*, Elsevier. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890422011049>.
14. Hassan, Q., Algburi, S., Sameen, A. Z., Jaszczur, M., & Salman, H. M. (2024). Hydrogen as an energy carrier: Properties, storage methods, challenges, and future implications. *Environmental Systems and Decisions*, 44(2), 327–350.
15. Sadeq, A. M., et al. (2024). Hydrogen energy systems: Technologies, trends, and future prospects. *Science of the Total Environment*, 939, 173622. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969724037690>.

References

1. Boichenko, S., Kalmykova, N. (2020) Benchmarking the efficiency of hydrogen accumulation and storage as motor fuel. *Science-intensive technologies*, (4), 496–512.
2. Boichenko, S., Chen, L., Korovushkin, V., & Biliakovych, O. (2025). PEST- and SNW-analysis of the use of liquid hydrogen as a motor fuel in aviation. *System Research in Energy*, (1 (81), 61–73. <https://doi.org/10.15407/srenergy2025.01.061>.
3. Boichenko, S., Chen, L., (2024). Comparative analysis of hydrogen production, accumulation, distribution, and storage systems. *System Research in Energy*, (3 (79), 13–20. <https://doi.org/10.15407/srenergy2024.03.013>.
4. Tashcheyev Yu. V., Voitko S. V., Trofymenko O. O., Repkin O. O., Kudrya T. S. (2020) Global trends in the development of hydrogen technologies in industry. *Business Inform.*(8), 103–114. <https://doi.org/10.32983/2222-4459-2020-8-103-114>.
5. Dai, S., Shen, P., Deng, W., & Yu, Q. (2024). Hydrogen energy in electrical power systems: A review and future outlook. *Research Gate*. https://www.researchgate.net/publication/383444047_Hydrogen_Energy_in_Electrical_Power_Systems_A_Review_and_Future_Outlook.
6. Boichenko, S., & Tarasiuk, O. (2022). World practices and prospects of using hydrogen as a motor fuel. In 2022 IEEE 8th International Conference on Energy Smart Systems (ESS) (pp. 01–06). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ESS57819.2022.9969276>.
7. Kosturjak, A., Dey, T., Young, M., & Whetton, S. (2019). Advancing hydrogen: Learning from 19 plans to advance hydrogen from across the globe. *Future Fuels* CRC.
8. International Renewable Energy Agency (IRENA). (2019). *Hydrogen: A renewable energy perspective* (Report for the 2nd Hydrogen Energy Ministerial Meeting, Tokyo, Japan). https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA_Hydrogen_2019.pdf.
9. Hydrogen Valley (2025). H2U. Retrieved April 27, 2025, from <https://h2u.ua/ua/proekty/>.
10. Serhiy Pyshyev, Yuriy Lypko, Yuriy Demchuk, Oleh Kukhar, Bohdan Korchak, Iryna Pochapska, Ihor Zhytnetskyi. Characteristics and applications of waste tire pyrolysis products: A review // *Chemistry & Chemical Technology*. – 2024. – Vol. 8. – № 2. – P. 244–257. <https://doi.org/10.23939/chcht18.02.244>
11. European Commission. (2020). A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0301>.
12. Boichenko, S., Danilin, O., Shkilniuk, I., Yakovlieva, A., Khotian, A., Pavlovskyi, M., Lysak, R., Shamanskyi, S., Kryuchkov, A., & Tarasiuk, O. (2023). Substantiating the expediency of using hydrogen fuel cells in electricity generation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(8(123)), 17–29. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.280046>.
13. Rasul, M. G., Hazrat, M. A., Sattar, M. A., Jahirul, M. I., & Shearer, M. J. (2022). The future of hydrogen: Challenges on production, storage and applications. *Energy Policy*, Elsevier. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890422011049>.
14. Hassan, Q., Algburi, S., Sameen, A. Z., Jaszczur, M., & Salman, H. M. (2024). Hydrogen as an energy carrier: Properties, storage methods, challenges, and future implications. *Environmental Systems and Decisions*, 44(2), 327–350.
15. Sadeq, A. M., et al. (2024). Hydrogen energy systems: Technologies, trends, and future prospects. *Science of the Total Environment*, 939, 173622. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969724037690>.