

С. О. ФЕДУЛОВА, д-р екон. наук, проф.

## ПОТЕНЦІАЛ ВОДНЕВОЇ ЕКОНОМІКИ ТА НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИЙ РОЗВИТОК<sup>1</sup>

**Резюме.** У статті розглянуто питання виробництва водню та формування його собівартості як рішення світових енергетичних проблем. Головна ідея статті зосереджена на дослідженні потенціалу водневої економіки для досягнення цілей Паризької кліматичної угоди та декарбонізації багатьох секторів викидів. Дослідження розкриває та описує головні шляхи виробництва сірого, синього та зеленого водню і пов'язані з ними проблеми зниження собівартості одного кілограма водню. Водень є універсальним енергоносієм як за способом його виробництва, так і за кінцевими продуктами, які він може виготовляти. У статті описано функціонування регіональних ринків водню з чинними ланцюгами створення вартості. Визначено й обґрунтовано головні характеристики торгівлі воднем в епоху енергетичного переходу. Вуглецемісткість є ключовою характеристикою торгівлі воднем. Однією з поширених проблем, що пов'язані з електролізом, є споживання води, яка використовується як сировина. Отже, вода є ще одним важливим ресурсом у виробництві водню. Визначено, що не передбачається ситуації, коли споживання води стане головною перешкодою для розширення використання відновлюваного водню. У дослідженні обґрунтовано, що вартість зеленого водню знизиться до 2030 р. через зниження вартості електроенергії та очікуване зниження вартості електролізерів. Постійні технологічні інновації та економія на масштабі, імовірно, також сприятимуть зниженню ціни. Вчені прогнозують, що до 2050 р. вартість зеленого водню буде навіть нижчою, ніж блакитного водню. Водень може забезпечити декарбонізацію багатьох секторів викидів. Причому роль регулювання викидів вуглецю життєво важлива для підвищення привабливості водневих технологій для інвесторів.

**Ключові слова:** воднева економіка, низьковуглецевий розвиток, декарбонізація, електроліз, водень, собівартість.

### ВСТУП

Водень привертає увагу як потенційне рішення світових енергетичних проблем. Зараз, як ніколи, нам потрібно прийняти водень як глобальне енергетичне рішення. Однак вартість виробництва водню була головною перешкодою для його широкого використання. Ціна водню залежить від декількох факторів, з-поміж яких спосіб виробництва, тип використовуваної сировини та ефективність процесу.

Одним із перспективних методів виробництва водню є електроліз, що працює від відновлюваних джерел енергії (наприклад, сонця або вітру). Водень, отриманий цим методом, відомий як зелений водень. Хоча цей метод є екологічно чистим, він залишається занадто дорогим, щоб бути комерційно життєздатним на цей момент.

Висока вартість електролізерів і неефективність процесу електролізу спричиняють

високу вартість зеленого водню. Попри це, зелений водень може відіграти значну роль у зусиллях із декарбонізації, якщо витрати знизяться.

Оскільки відновлювані джерела енергії стають більш доступними, а електроліз досягає технологічного прогресу, то вартість екологічного чистого водню та водневого палива буде знизуватися. Це може зробити його цінним інструментом для зменшення викидів вуглекислого газу в таких галузях, як транспорт і виробництво. Зелений водень може стати ключовим гравцем у переході до більш чистого та сталого енергетичного майбутнього.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Останніми роками відбулося значне прискорення досліджень і розробок, які пов'язані з виробництвом водню. Це було зумовлено збігом факторів, деякі з яких включають зрілість техно-

<sup>1</sup> Стаття підготовлена в рамках реалізації міжнародного проекту «Висвітлення нової архітектури європейської безпеки у викладанні та наукових дослідженнях» № 101126795 – EuSANU – ERASMUS-JMO-2023-HEI-TCH-RSCH



Co-funded by  
the European Union

Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency. Neither the European Union nor the granting authority can be held responsible for them.

Фінансується Європейським Союзом. Проте висловлені погляди та думки належать лише автору і не обов'язково відображають погляди Європейського Союзу чи Європейського виконавчого агентства з питань освіти та культури. Ні Європейський Союз, ні грантодавець не можуть нести за них відповідальність.

логій, значне зниження вартості відновлюваної енергії та зростаюче визнання її потенціалу як одного з небагатьох способів досягти повної декарбонізації. Окрім того, навіть попри те, що світовий енергетичний баланс сильно залежить від викопного палива, глобальні зусилля спрямовані на зменшення цієї залежності та підвищення гнучкості енергопостачання.

Повномасштабне військове вторгнення росії в Україну та наступні геополітичні потрясіння в усьому світі призвели до зростання цін на природний газ більш ніж на 300 % станом на кінець 2023 року. Згідно з останніми прогнозами, ціни навряд чи впадуть. Підвищені ціни на природний газ у більшості країн світу означає, що не лише зелений водень уже конкурує за ціною з сірим воднем, але це і спосіб очікувати вартість зеленого водню до 1,50 дол. США/кг H<sub>2</sub> до 2030 року.

Регіональні ринки водню добре налагоджені щодо роботи з чинними ланцюгами створення вартості. Однак у контексті цілей сталого розвитку, вертикалі цього ланцюга створення вартості мають бути перероблені для водню, щоб реалізувати справжній потенціал декарбонізації, який він має.

Водень є універсальним енергоносієм як за способом його виробництва, так і за кінцевими продуктами, які він може виготовляти. Доступність зеленого водню пов'язана з наявністю джерел енергії з низьким вмістом вуглецю (вітру, сонця та гідроенергії). Поточні прогнози свідчать про те, що перебудова ланцюга створення вартості з сірого на зелений водень навряд чи відбудеться раніше 2030-х років. Виробництво водню з викопного палива наразі більш економічно конкурентоспроможне, ніж із відновлюваних джерел, але в довгостроковій перспективі відновлюваний (зелений) водень має вийти на перше місце.

**Метою статті** є дослідження потенціалу водневої економіки для досягнення цілей Паризької кліматичної угоди та декарбонізації багатьох секторів викидів.

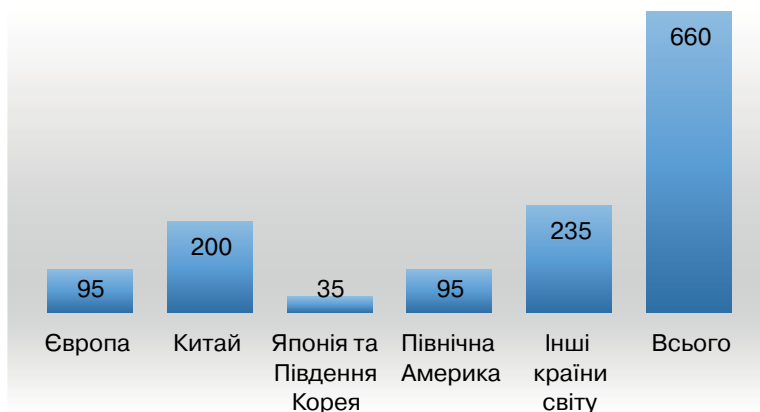
### ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Огляд поточного ринку водню та прогноз майбутнього попиту були опубліковані в нещодавньому дослідженні Водневої ради у співпраці з McKinsey [1]. У 2020 р. 90 млн т водню було вироблено переважно з природного газу. Згідно з прогнозами, ринок водню досягне 660 млн т у 2050 році. Майже 45 % ринку представлено КНР та Європою, які, як очікується, споживатимуть 200 млн т і 95 млн т водню відповідно (**рис. 1**).

Вуглецемісткість є головною характеристикою торгівлі воднем в епоху енергетичного переходу. Вуглецевий вміст синього водню, отриманого з природного газу та вугілля, становить орієнтовно 9 кг CO<sub>2</sub>-екв/кг H<sub>2</sub> і 20 кг CO<sub>2</sub>-екв/кг H<sub>2</sub> відповідно. Застосування технології зі ступенем уловлювання 90 % може знизити показники до 1 кг CO<sub>2</sub>-екв/кг H<sub>2</sub> та 2 кг CO<sub>2</sub>-екв/кг H<sub>2</sub> для синього водню на основі природного газу та вугілля відповідно [2].

Вуглецемісткість зеленого водню залежить від джерела електроенергії, що живить електролізери. Поки джерело енергії є відновлюваним (вітер, сонце тощо), зелений водень не виробляє викидів парникових газів.

Вода є ще одним важливим ресурсом у виробництві водню. Недавнє дослідження показало, що у процесі виробництва зеленого водню потрібно приблизно 9 л води для виробництва 1 кг водню. Що стосується ПОМ електролізера це число сягає 18 кг на 1 кг водню. Водний слід процесу одержання водню на основі природного газу варіюється від 13 до 18 кг води на 1 кг водню. Найбільший водний слід (40–85 кг води



**Рис. 1.** Прогнозний попит на водень у 2050 р., т  
**Джерело:** складено автором на основі [1].

на 1 кг водню) належить низьковуглецевому водню, отриманому під час газифікації вугілля [1].

З урахуванням проблеми нестачі води, що насувається в Україні, необхідно здійснити ретельний аналіз водного балансу, чітко визначивши, скільки води споживатиметься кожним сектором. Розвиток водневої енергетики в країні не має надавати пріоритету енергетичному переходу на шкоду водній безпеці. Наразі найдешевшим способом виробництва водню є сірий, ціна якого 1–1,9 дол. США/кг  $H_2$  (табл. 1).

Вартість водню на основі викопного палива нижча за ціну екологічного водню через високі темпи видобутку природного газу, наявну інфраструктуру та низьку вартість викопного палива. Однак високі викиди вуглецю, що пов'язані з виробництвом водню на основі викопного палива, роблять його нежиттєздатним у довгостроковій перспективі. З іншого боку, виробництво екологічно чистого водню досі перебуває на ранніх стадіях, а вартість є відносно високою.

Однією з поширених проблем, пов'язаних з електролізом, є споживання води, яка використовується як сировина, і чи може це стати обмеженням для великомасштабного виробництва водню. Навіть якщо весь попит на водень до 2050 р. буде задоволений електролітичним воднем, споживання води становитиме приблизно 25 млрд кубометрів. Споживання води для сільськогосподарських потреб є найбільшим і становить майже 2800 млрд кубометрів, для промислових потреб — близько 800 млрд кубометрів і 470 млрд кубометрів для комунальних потреб [4]. Водний слід — це дуже специфічний параметр, який залежить від місцевої наявності води, споживання, деградації та забруднення. Необхідно враховувати баланс з екосистемою та вплив довгострокових кліматичних тенденцій.

Брак води є критичним параметром для виробництва зеленого водню. Регіонам, які стикаються з дефіцитом води, доведеться розглянути можливість транспортування води або опріснення, що знову підвищить загальні виробничі витрати. Однак не передбачається, що споживання води стане головною перешкодою для розширення використання відновлюваного водню.

Таким чином, навіть якщо очікується значне зростання споживання води через зміну електролітичного шляху та зростання попиту, споживання води для виробництва водню все одно буде набагато меншим, аніж інші потоки для використання людиною.

Однак тенденції вказують на те, що зелений водень стане доступнішим, оскільки витрати на відновлювану енергію зменшаться, а виробництво електролізерів буде вдосконалено. Окрім того, ціни на сірий водень є нестабільними, оскільки вони безпосередньо залежать від ринку природного газу. Наприклад, протягом 2020 р. через Covid-19 ціни на природний газ у Європі зросли втричі, що призвело до підвищення цін на сірий і синій водень [5].

Зменшення витрат на зелений водень і розширення впровадження йдуть пліч-о-пліч. Насамперед технологія має вдосконалюватися, щоб створити більш ефективні електролізери комерційного масштабу. Необхідно також створити інфраструктуру для транспортування водню від виробничих потужностей до судноплавних або виробничих центрів.

Збільшення виробничих потужностей та інвестиції в розвиток інфраструктури забезпечать економію на масштабі, що призведе до зниження собівартості виробництва.

Таким чином, складно передбачити, як швидко знизяться витрати, а самі оцінки є надто змінними. Але Міжнародне енергетичне агентство

Таблиця 1

Виробництво сірого, синього та зеленого водню

Вид водню	Технологія виробництва	Вуглецемісткість, $CO_2$ -екв/кг $H_2$	Водний слід, кг води/кг $H_2$	Собівартість продукції, дол. США/кг $H_2$
Сірий водень	Парова конверсія метану	9	14–17	1,0–1,9
	Газифікація вугілля	20	41–86	1,6–1,8
Синій водень	Парова конверсія метану	1	13–17	1,4–2,4
	Газифікація вугілля	2	41–86	2,0–2,2
Зелений водень	Електроліз води	0	9–18	2,6–6,6

Джерело: складено автором на основі [1; 2; 3].

(МЕА) прогнозує зниження собівартості водню на 30 % до 2030 року [6].

Оскільки водень вважається одним з основних інструментів досягнення цілей декарбонізації, то він масово використовуватиметься в різних галузях економіки. Водень може транспортуватися в різних фазах (у газоподібному, рідкому та твердому стані). Умови експлуатації (температура, тиск, гравіметрична ємність тощо) формують вартість зберігання та транспортування водню. Високі ціни на вуглець у майбутньому можуть значно підвищити конкурентоспроможність як синього, так і зеленого водню.

Водень може забезпечити декарбонізацію багатьох секторів викидів, однак поточні витрати на використання водню не можуть конкурувати з витратами на традиційні вуглецеві технології. Роль регулювання викидів вуглецю життєво важлива для підвищення привабливості водневих технологій для інвесторів.

Станом на липень 2021 р. 43 країни розробили дорожні карти розвитку екологічного водню, а уряди пообіцяли виділити мільярди на підтримку проектів екологічного водню. Як наслідок, у 2021 р. кількість нових проектів із використання зеленого водню зросла більш ніж утричі. Однак цих програм недостатньо для задоволення глобальних вимог. Згідно з оцінками Boston Consulting Group, урядам доведеться інвестувати до 12 трлн дол. США до 2050 р., з них 700 млрд дол. США до 2030 р., щоб задовольнити попит на екологічно чистий водень, необхідний для досягнення цілей Паризької кліматичної угоди щодо нульового чистого водню до 2050 року [7].

До 2050 р. декілька факторів можуть сприяти зниженню витрат на виробництво водню. Економія на масштабі, навчання на основі глобального розгортання та інновації можуть привести до зниження вартості електролізу, але, що більш важливо, глобальне впровадження відновлюваних джерел енергії може сприяти зниженню витрат на електроенергію, зокрема для сонячної фотоелектричної енергії. У майбутньому, коли буде розгорнуто майже 14 ТВт сонячної фотоелектричної енергії, 6 ТВт наземної вітрової енергії та 4–5 ТВт електролізу, витрати на виробництво водню можуть сягнути рівнів, нижчих за 1 дол. США/кг H<sub>2</sub> для більшості країн за найоптимістичнішим сценарієм. За менш оптимістичним сценарієм із вищими витратами на технології, до 2050 р. більшість країн будуть мати рівень витрат 1,5 дол. США/кг H<sub>2</sub> [8].

Невизначеність цих витрат полягає в потенційному уповільненні зниження вартості відновлюваної енергії та електролізу. Це може бути

через обмеження ланцюга поставок, вищі ціни на товари та інфляцію. Іншою важливою невизначеністю є мінімальні витрати на відновлювані джерела енергії та електроліз.

Водень є ключовим стовпом декарбонізації для промисловості, хоча більшість технологій, які можуть внести значний внесок, ще лише зароджуються. Робляться серйозні кроки. Перший у світі пілотний проект з виробництва безвуглецевої сталі з використанням водню з низьким вмістом вуглецю почав працювати цього року у Швеції. В Іспанії наприкінці 2021 р. розпочався пілотний проект із використання змінного водню на основі відновлюваних джерел енергії для виробництва аміаку. Очікується, що декілька проектів у масштабі десятків кілотонн водню почнуть працювати впродовж наступних двох–трьох років. Також розробляються демонстраційні проекти використання водню в таких промислових цілях, як виробництво цементу, кераміки або скла.

Ґрунтуючись на припущеннях щодо вартості електролізера, прогнозах у сонячній енергетиці та темпах навчання, науковці підкреслюють економічну життєздатність виробництва зеленого водню в промисловості ОАЕ між 2032 і 2038 рр. з виробничими витратами на рівні 0,95 дол. США/кг і 1,35 дол. США/кг [9].

## ВИСНОВКИ

Отже, очікується, що вартість зеленого водню знизиться до 2030 р. через зниження вартості електроенергії та очікуване зниження вартості електролізерів. Постійні технологічні інновації та економія на масштабі також, імовірно, сприятимуть зниженню ціни.

З нинішніми високими цінами на нафту та газ паритет вартості зеленого і блакитного водню вже досягнуто в деяких частинах Європи, що робить зелений водень більш доцільним. Фахівці прогнозують, що до 2050 р. вартість зеленого водню буде навіть нижчою за ціну блакитного водню.

Попри зниження вартості, зелений водень досі в 2–3 рази дорожчий за блакитний водень, який також вважається чистим, оскільки вуглець уловлюється та зберігається. Найважливішою складовою вартості зеленого водню є вартість відновлюваної енергії, необхідної для електролізу. Таким чином, щоб зробити зелений водень конкурентоспроможним, низькі витрати на електроенергію є необхідною умовою. Зі зниженням витрат на відновлювану енергію вартість виробництва зеленого водню також знизиться. Другим за величиною компонентом витрат є електролізер, який потребує зниження витрат на інвестиції та будівництво і збільшення про-

дуктивності та довговічності, щоб зробити екологічно чистий водень конкурентоспроможним.

Також треба зазначити, що і брак води є критичним параметром для виробництва зеленого водню. Вірогідно, регіонам, які стикаються з дефіцитом води, доведеться розглянути можливість транспортування води або опріснення, що знову підвищить загальні виробничі витрати. Однак не передбачається, що споживання води стане головною перешкодою для розширення використання відновлюваного водню.

Необхідним є набагато швидше впровадження водню з низьким вмістом вуглецю, щоб вивести світ на шлях сталої енергетичної системи до 2050 року. Розвиток глобального ринку водню може допомогти країнам з обмеженим внутрішнім потенціалом постачання, водночас забезпечуючи експортні можливості для країн із великими сховищами відновлюваної енергії. Міжнародна співпраця має вирішальне значення для прискорення впровадження водню.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Global Hydrogen Flows — 2023 Update (Hydrogen Council in collaboration with McKinsey & Company) [Electronic resource] // Official website of the Hydrogen Council. — Access mode: <http://www.hydrogencouncil.com>.
2. Global Hydrogen Review 2021 [Electronic resource] // Official website of the International Energy Agency. — Access mode: <http://www.iea.org>.
3. DATABASE Statista.com [Electronic resource]. — Access mode: <https://www.statista.com/statistics/1179498/us-hydrogen-production-costs-forecast/>.
4. World Energy Transitions Outlook: 1.5°C // Pathway, International Renewable Energy Agency. — Abu Dhabi, 2021. — 312 p.
5. Koons E. Hydrogen Cost: Can We Afford It? (n.d.) [Electronic resource] / E. Koons // Official website of the Energy Tracker Asia. — 2023. — Access mode: <https://energytracker.asia/hydrogen-cost/>.
6. Reducing the Cost of Capital Strategies to unlock clean energy investment in emerging and developing economies. World Energy Investment // Special Report. International Energy Agency. — 2023. — 89 p.
7. Building the Green Hydrogen Economy // Boston Consulting Group. — 2023. — 36 p.
8. Morgan H. OPINION | Why market dynamics will reduce the average price of green hydrogen to \$1.50/kg by 2030 [Electronic resource] / H. Morgan. — Recharge. DN Media Group, 2023. — Access mode: <https://www.rechargenews.com/energy-transition/opinion-why-market-dynamics-will-reduce-the-average-price-of-green-hydrogen-to-1-50-kg-by-2030/2-1-1292801>.
9. Ibrahim M. Transition to Low-Carbon Hydrogen Energy System in the UAE: Sector Efficiency and Hydrogen Energy Production Efficiency Analysis / M. Ibrahim, F. Binofai, M. Mohamad // Energies. — 2022. — No. 15 (18). — 6663.

#### REFERENCES

1. Global Hydrogen Flows — 2023 Update. (Hydrogen Council in collaboration with McKinsey & Company). *Official website of the Hydrogen Council*. Retrieved from: <http://www.hydrogencouncil.com>.
2. Global Hydrogen Review 2021. Official website of the International Energy Agency. Retrieved from: <http://www.iea.org>.
3. DATABASE Statista.com. Retrieved from: <https://www.statista.com/statistics/1179498/us-hydrogen-production-costs-forecast/>.
4. (2021). World Energy Transitions Outlook: 1.5°C Pathway. *International Renewable Energy Agency*. Abu Dhabi, 312 p.
5. Koons, E. (2023). Hydrogen Cost: Can We Afford It? (n.d.). *Official website of the Energy Tracker Asia*. Retrieved from: <https://energytracker.asia/hydrogen-cost/>.
6. (2023). Reducing the Cost of Capital Strategies to unlock clean energy investment in emerging and developing economies. *World Energy Investment Special Report*. International Energy Agency, 89 p.
7. (2023). Building the Green Hydrogen Economy. Boston Consulting Group, 36 p.
8. Morgan, H. (2023). OPINION | Why market dynamics will reduce the average price of green hydrogen to \$1.50/kg by 2030. *Recharge. DN Media Group*. Retrieved from: <https://www.rechargenews.com/energy-transition/opinion-why-market-dynamics-will-reduce-the-average-price-of-green-hydrogen-to-1-50-kg-by-2030/2-1-1292801>.
9. Ibrahim, M., Binofai, F., & Mohamad, M. (2022). Transition to Low-Carbon Hydrogen Energy System in the UAE: Sector Efficiency and Hydrogen Energy Production Efficiency Analysis. *Energies*. 15(18), 6663.

FEDULOVA S. O., D. Sc. of Economics, Professor

#### HYDROGEN ECONOMY POTENTIAL AND LOW-CARBON DEVELOPMENT

**Abstract.** *The issue of hydrogen production and the formation of its cost price as a solution to global energy problems has been examined in the article. The main idea of the article is focused on exploring the potential of the hydrogen economy to achieve the goals of the Paris Climate Agreement and decarbonize many emission sectors. The study reveals and describes the main ways of producing gray, blue and green hydrogen and related problems of reducing the cost of one kilogram of hydrogen. Hydrogen is a universal energy carrier, both in the way it is produced and in the final products it can produce. The functioning of regional hydrogen markets with existing value chains has been described in the article. The main characteristics of hydrogen trade in the era of energy transition are defined and substantiated. Carbon intensity is a key characteristic of hydrogen trade. One of the common problems associated with electrolysis is the consumption of water used as feedstock. Therefore, water is another important resource in the production of hydrogen. It was determined that a situation is not foreseen when water consumption will become the main obstacle to the expansion of the use of renewable hydrogen. The study substantiates that the cost of green hydrogen will decrease by 2030 due to the decrease in the cost of electricity and the expected decrease in the cost of electrolyzers. Continued technological innovation and economies of scale are also likely to*