

УДК: 336.741.231

<https://doi.org/10.32342/3041-2137-2025-1-62-10>

С.О. Федулова,

доктор економічних наук, професор, завідувач кафедри глобальної економіки
Університету імені Альфреда Нобеля, м. Дніпро (Україна)

<https://orcid.org/0000-0002-5163-3890>

О.А. Півоваров,

доктор технічних наук, професор, професор кафедри харчових технологій Дніпровського
державного аграрно-економічного університету, м. Дніпро, (Україна)

<http://orcid.org/0000-0003-0520-171X>

А.Я. Калиновський,

кандидат технічних наук, доцент, начальник кафедри інженерної та аварійно-рятувальної
техніки Національного університету цивільного захисту України, м. Харків (Україна)

<http://orcid.org/0000-0002-1021-5799>

ФОРМУВАННЯ ЛАНЦЮГІВ СТВОРЕННЯ ВАРТОСТІ ЗЕЛЕНОГО ВОДНЮ

Світ вступає в безпрецедентний період, коли наші енергетичні системи почнуть радикально змінюватися. Статтю присвячено питанню визначення особливостей формування ланцюгів створення вартості зеленого водню. Головною ідеєю дослідження було визначення та опис потенційних можливостей швидкого зростання глобальної водневої економіки і особливостей створення вартості зеленого водню в зазначених умовах глобальної водневої економіки. Актуалізовано, що затримка в розвитку систематичної та зрілої водневої економіки в основному пов'язана зі складними умовами зберігання та аспектом безпеки його транспортування. У дослідженні обґрунтовано, що ланцюжок створення вартості зеленого водню можна поділити на такі елементи: верхні (виробництво), проміжні (зберігання та транспортування) і нижні (кінцеве споживання). Кожен із цих компонентів водневого ланцюга створення вартості потребує вирішення окремих технічних та соціально-економічних проблем. Процес виробництва водню призводить до витрат на виробництво, оскільки водень не є природним джерелом, що робить його ціну в 3 рази вищою, ніж викопного палива. Слід також враховувати, що зберігання та транспортування може ще значно збільшити вартість водню як продукту. Таким чином, зберігання та транспортування запасів водню становить значні проблеми. У дослідженні аналітично доведено, що навіть за умови, що водень має майже втричі більший енергетичний вміст, ніж транспортне паливо, при сьогоdnішніх умовах та цінах все одно його використання майже втричі дорожче, ніж використання інших видів викопного палива. При цьому в статті зазначається, що молекулярний водень є найбільш оптимістичним рішенням для досягнення вуглецевої нейтральності енергетичної економіки, і він потребує наукового втручання для його виробництва, зберігання та транспортування. Отже, виробництво зеленого водню з відновлюваних джерел енергії розглядається як потенційне рішення для досягнення мети скорочення викидів вуглецю у промисловості, сприяння розвитку відновлюваних джерел енергії та забезпечення енергетичної безпеки для країн. У дослідженні подано потенційно можливі особливості створення вартості зеленого водню та описано потенційні шляхи використання зеленого водню в економіці в найближчій перспективі.

Ключові слова: воднева економіка, зелений водень, енергетичний перехід, ланцюги створення вартості, вуглецева нейтральність, енергетична безпека

JEL classification: O13, O14, P28, Q56, Q57

Постановка проблеми. Світ вступає в безпрецедентний період, коли існуючі енергетичні системи почнуть радикально змінюватися, оскільки нові технології стануть більш доступними та дозволять таким речам, як «зелений» водень, зробити значний крок у досягненні цілей декарбонізації.

Уряди і зацікавлені сторони в галузі останнім часом активізували зусилля з виробництва екологічно чистого водню, газу з нульовим вмістом вуглецю, що виробляється шляхом електролізу води, який отримується від електрики з відновлюваних джерел енергії. Ідея полягає в тому, щоб «зберігати» відновлювану електроенергію у вигляді водню в періоди, коли споживання електроенергії мінімізовано, а не згорти виробництво.

Молекулярний водень є найбільш оптимістичним рішенням для досягнення вуглецевої нейтральної енергетичної економіки, у зв'язку з цим потрібне наукове втручання для його виробництва, зберігання та транспортування. У даний час водень виробляється в основному зі звичайного викопного палива. Виробництво водню з природного газу за допомогою процесів часткового окислення та парової конверсії є відносно зрілим процесом. А виробництво водню з потенційних відновлюваних і біологічних джерел, таких як розщеплення води та перетворення біомаси, є сприятливим підходом.

Затримка розвитку систематичної та зрілої водневої економіки в основному пов'язана зі складними умовами зберігання водню та аспектом безпеки його транспортування. Природний газ, збагачений воднем, H₂NG, є сумішшю водню та природного газу. Інколи зустрічається технічна назва «гітан» (Hythane) для суміші водню та природного газу, що може бути як міст для водневої економіки завдяки спільному використанню поточної інфраструктури природного газу [1]. У цьому випадку витрати на виробництво водню суттєво знижуються, перш ніж він стане конкурентоспроможним.

Згідно з новим аналізом Міжнародного агентства з відновлюваних джерел енергії

(IRENA), швидке зростання глобальної водневої економіки може призвести до значних геоекономічних і геополітичних зрушень, що здатні породити хвилю нових взаємозалежностей. Водень змінить географію торгівлі енергією та регіоналізацію енергетичних відносин, вказуючи на появу нових центрів геополітичного впливу, базованих на виробництві та використанні водню, оскільки традиційна торгівля нафтою та газом втрачає активність.

Керуючись нагальною проблемою зміни клімату та зобов'язаннями країн щодо нульового чистого видобутку водню, IRENA прогнозує, що він покриватиме до 12% світового споживання енергії до 2050 р. Зростаюча торгівля та цільові інвестиції на ринку, на якому домінує викопне паливо і який зараз оцінюється в 174 млрд дол. США, ймовірно, підвищить економічну конкурентоспроможність і вплине на зовнішньополітичний ландшафт завдяки двостороннім угодам, які значно відрізняються від вуглеводневих відносин XX ст. [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Використання неуглецевого палива є одним з очевидних шляхів зменшення викидів CO₂. Прикладами такого палива є водень, аміак, аміачно-водневі суміші [3; 4; 5]. Часткова або повна заміна викопного палива воднем є перспективним способом декарбонізації існуючих теплових електростанцій.

Є два напрями для скорочення викидів CO₂ на існуючих електростанціях: «після спалювання» і «до спалювання» [6; 7; 8]. Спосіб «до спалювання» ґрунтується на уловлюванні CO₂ з димових газів та його подальшій утилізації. Декарбонізація палива перед спалюванням для газових турбін базується на концепції палива з низьким або нульовим вмістом вуглецю, яке використовується для виробництва електроенергії (збагачені воднем суміші палив, що містять вуглець, неуглецеве паливо, наприклад, водень, аміак, аміачно-водневі суміші).

Є спроби використання водню в існуючих газотурбінних установках великої потужності. У квітні 2022 р. Long Ridge Energy Terminal і General Electric

(США) повідомили про результати успішної утилізації метано-водневої суміші на електростанції комбінованого циклу [9]. Випробування проводилися, щоб показати можливість використання природного газу, розбавленого воднем. Під час випробувань газової турбіни інженери використовували суміш водню і метану в різних пропорціях. Як паливо використовувався багатий на водень газ із 5–30% чистого водню.

Очевидно, що зелений водень є одним із найбільш екологічно чистих видів палива, оскільки в паливному циклі не міститься вуглецю. Однак для виробництва зеленого водню потрібно споживати відновлювану енергію. Можна виділити основні технології електролізу: електроліз лужної води, лужні аніонообмінні мембрани (ААЕМ), електроліз твердих оксидів та протонообмінна мембрана (РЕМ) [10]. Перший здатний до великомасштабного виробництва зеленого водню, але з помірно низькою ефективністю. Друга методика характеризується високою ефективністю, але з високою вартістю обладнання. Тому РЕМ електроліз є найбільш прийнятний для маломасштабного виробництва зеленого водню.

Кілька різних установ і компаній зайняті пошуком, як зробити сховище водню компактним. Наприклад, розробляються технології, які використовують твердотільні матеріали, що містять водень, у центрі системи накопичення енергії від побутових або комерційних сонячних панелей на даху, які можуть конкурувати з акумуляторами. Система включатиме невеликий електролізер, що розщеплює воду для генерування водню, і паливний елемент для вивільнення енергії. Порівняно з літій-іонною батареєю, система потенційно може накопичувати набагато більше енергії за аналогічної площі та повинна мати робочий термін служби приблизно 30 років, з яким не може зрівнятися жодна існуюча літій-іонна батарея [11].

Хоча зберігання та ефективне виробництво є проблемою для водню, потенціал технології означає, що вона заслуговує все більшої уваги в енергетичних колах. Водень відіграє значну роль в енергетичному

ландшафті майбутнього. Його здатність накопичувати енергію протягом тривалого часу не може зрівнятися з акумуляторами. Диверсифікуючи зберігання енергії та застосовуючи різні технології до контекстів, до яких вони найбільше підходять, можливо запобігти кліматичній катастрофі.

Водень стискається, зріджується або перетворюється на аміак (NH_3), коли його створюють для транспортування до кінцевого споживача або для зберігання. У результаті цього процесу вартість водню для кінцевого споживача зростає. Після врахування початкової вартості будівництва компресорної установки, а також кількості використаної енергії прогнозована вартість стиснення водню становить від 1 до 1,5 дол. США/кг [12]. При зрідженні водню цей процес збільшує собівартість виробництва на 2-3 дол. США/кг [13]. До 2030 р. ціна перетворення водню в аміак прогнозується в районі \$ 0,4–0,9/кг [14] і може вважатися одним з найбільш прийнятних варіантів. Наразі виробництво сірого і блакитного водню коштує 1,27–2,37 дол. США/кг порівняно із зеленим воднем, який коштує від 5,5 до 9,5 дол. США/кг [14].

Транспортування водню до промислових заводів або до інших кінцевих споживачів після конверсії також підвищить вартість водню. Витрати на транспортування водню можна зменшити, використовуючи зріджений водень, а не стиснений, оскільки його можна транспортувати у більших кількостях. Іншою потенційною альтернативою є транспортування водню по трубопроводах, але для цього знадобляться значні початкові інвестиції в трубопроводи – до мільйонів доларів на кожен кілометр трубопроводу. Воднепровід може потребувати витрат, які на 110-150% дорожчі, ніж газопровід [14]. Проте можна переобладнати труби природного газу для транспортування водню за ціною 10-25%. Кораблі є найбільш рентабельною технікою для переміщення величезних кількостей і об'ємів водню, за ними слідують водневі трубопроводи [15].

Крім того, незважаючи на те, що ідеї зеленого водню продовжують зростати з кожним роком, цей тип водню ще не має реального попиту для практичного застосування, наприклад у металургії, для виробництва екологічно чистої сталі або у хімічній промисловості – для екологічно чистого аміаку.

Проекти зеленого водню потребуватимуть значної кількості відновлюваної енергії та води як сировини для електролізерів. Вода використовується як основне вихідне джерело для електролізу води та отримання водню. Було проведено багато досліджень, спрямованих на оцінку кількості води, необхідної під час електролізу води. Відповідно для отримання *1 кг водню буде необхідно близько 9 л води* [16]. Наявність великого запасу вихідної води для виробництва водню має важливе значення, а забезпечення стабільності та легкодоступності води є проблемою, яку необхідно вирішити, особливо в районах, схильних до посухи. Зрозуміло, що виробництво зеленого водню з води має гарантувати, що воно не впливає на водопостачання для інших основних цілей, таких як побутова вода для житлових районів або вода для поливу у сільськогосподарському споживанні.

Ще одна проблема, яку слід згадати – це кількість землі, яка використовується для проєктів з виробництва екологічно чистого водню. У той час як заводи з електролізу води, ймовірно, не займуть занадто багато місця, системи відновлюваної енергії, які забезпечують введення електроенергії для електролізерів, потребують значної земельної площі. Таким чином, наявність цих відновлюваних джерел енергії може частково призвести до змін у землекористуванні, впливаючи на соціальні та екосистемні фактори [17].

Незважаючи на вказані труднощі та виклики, потенціал ринку зеленого водню в майбутньому безперечний, що відображається в його здатності зменшувати викиди в промисловості, на транспорті, в енергетичних системах і будівлях. Зелений водень також має

потенціал для прискорення розвитку відновлюваних джерел енергії, забезпечуючи при цьому гнучкість енергетичної системи. У той же час зелений водень також здатний допомогти довгостроково зберігати енергію, щоб збалансувати сезонну різницю її постачання.

Метою статті є визначення особливостей формування ланцюгів створення вартості зеленого водню відповідно до класичного водневого квадрата.

Для досягнення зазначеної мети в дослідженні поставлено такі завдання:

- з'ясувати та описати потенційні можливості швидкого зростання глобальної водневої економіки;
- визначити особливості створення вартості зеленого водню в умовах швидкого зростання глобальної водневої економіки.

Виклад основного матеріалу дослідження. Протягом приблизно десятиліття проводиться низка спроб знизити вартість виробництва зеленого водню з приблизно *5-9 дол. США/кг до 1-1,50 дол. США/кг* [14]. Це потребуватиме низьких витрат на електроенергію та зниження ціни на електролізери. Міністерство енергетики США нещодавно запустило програму зі скорочення витрат на зелений водень і зниження цін, що є основною метою партнерства, спрямованого на розвиток хаба зеленого водню, наприклад в Лос-Анджелесі.

Розглядалися три основні стадії процесу:

- виробництво водню за допомогою електролізу,
- стиснення водню для транспортування,
- використання водню як палива на електростанціях комбінованого циклу.

Подібно до нафтової та газової промисловості, ланцюжок створення вартості водню можна поділити на верхні (виробництво), проміжні (зберігання та транспортування) і нижні (кінцеві) елементи. Кожен із цих компонентів водневого ланцюга створення вартості потребує вирішення своїх технічних та соціально-економічних проблем (рис. 1).



Рис. 1. Ланцюги створення вартості водню відповідно до водневого квадрата*
*Складено авторами.

Щоб отримати водень (з нульовими викидами), необхідно задіяти процес, який називається електролізом, при цьому в наукових розробках ще розглядаються термоліз, фотоелектроліз, біофотоліз (табл. 1). У процесі створення водню втрачається 20–30% енергії. Потім водень потрібно стиснути та зберегти, втрачаючи ще 10%. Нарешті, ще 30% втрачається при перетворенні водню в електрику. Це залишає близько 30–40% вихідної енергії. Реальна ефективність перетворення відновлюваної енергії за допомогою водню як енергоносія в електроенергію на електростанціях комбінованого циклу становить близько 38%. При цьому для виробництва водню потрібно майже стільки ж енергії, скільки для його доставки. Рейтинг енергоефективності для водню становить близько 60% [18].

Важливим аспектом, який завжди пропускають, є те, що ефективність виробництва електроенергії будь-якої теплової електростанції буде (менше) 40%. Діють прості фізичні закони. Під час зарядки батареї втрачається до 10% електроенергії. Встановлено, що ККД лужної води та протонно-мембранного

електролізу становить до 70 та 85% відповідно [19].

Цифри про ефективність є важливими, якщо реалістично дивитися на скорочення викидів вуглецю. Хоча високоефективна сонячна енергія є ідеальною, насправді паровий риформінг з уловлюванням вуглецю є дійсно ефективним (60–70% термічної ефективності під час генерації). Якщо мислити практично, то треба зазначити, що й літєва батарея також дуже важка і не ідеальна з точки зору щільності енергії.

Згідно з даними Массачусетського технологічного інституту та наукового журналу *Nature Energy*, технологія перетворення енергії на водень і назад на енергію має ефективність зворотного зв'язку 18–46%. Для порівняння, дві зрілі довготривалі технології, гідроакумуляуюча гідроелектростанція та накопичення енергії на стисненому повітрі, можуть похвалитися ККД 70–85% і 42–67% відповідно. Проточні батареї, технологія перезаряджуваних паливних елементів, яка є менш зрілою, мають ефективність обертання 60–80% [2].

Одна зі складностей «водневої економіки», якщо розглядати складову

Короткий опис технологій виробництва водню з води [20]

Технологія	Джерело енергії	Умови експлуатації	Зрілість
Електроліз	Електроенергія	до 30 МПа	Комерційна
		50–900 °С (залежно від використовуваного методу)	
Термоліз	Тепло	Температура >2500 °С (<1000 °С для термохімічних циклів)	Дослідження та розробки
Фотоелектроліз	Сонячна	Умови навколишнього середовища	Дослідження та розробки
Біофотоліз	Метаболізм мікроорганізмів	Умови навколишнього середовища	Дослідження та розробки

зберігання електроенергії, полягає в тому, що вона починається з електроенергії, яка потім використовується для виробництва та зрідження водню, який потім потрібно транспортувати в спеціалізованих охолоджувальних баках під тиском. Після цього водень розподіляється для використання в навантажувачі з водневим паливним елементом для виробництва електроенергії. Існують серйозні сумніви щодо економічної життєздатності цього процесу подвійного перетворення, а зберігання, транспортування та розподіл водню значно дорожчі, ніж електроенергії.

Водень також можна використовувати в паливних елементах. Ці електрохімічні пристрої, які поєднують газоподібний водень із киснем для отримання струму, можуть працювати з ефективністю в діапазоні від 50 до 60%, що значно краще, ніж більшість технологій спалювання.

Японський розробник автомобілів Генерал представив автомобіль з двигуном на водневому паливі. Відповідно технічного регламенту в бак такого автомобіля заливається вода. *1 л води вистачає на 80 км шляху* [20].

Також є відомості про науковий проєкт «Zero Emission SOFCs Operating on Methane Hydrates for Energy Security», який готується під егідою НАТО, сутність якого полягає у використанні паливних елементів, розроблених в Україні для отримання електроенергії з газогідратів Чорного моря [20].

Бензинові і дизельні автомобілі успішно займають свої місця на авторинку, електромобілі та гібриди завойовують все більшу популярність. При цьому до

останніх в майбутньому приєднаються і автомобілі на альтернативному паливі – водневих паливних елементах. Також яскравим прикладом є розробки компанії Honda, яка запропонувала експериментальні домашні водневі станції, що живляться енергією сонця, та великі станції, які можуть живитися відходами або органічною біомасою. Подібні дії допоможуть водню увійти в побутове споживання, не чекаючи промислового створення.

Водень природно має високу щільність енергії за вагою, але низьку щільність за об'ємом, що робить його цінним джерелом енергії, але і викликає окремі проблеми. Він може бути використаний як паливо для електромобілів та інших видів транспорту. За однакової маси водень містить більше енергії, ніж традиційні палива. Це означає, що автомобіль на паливних елементах з воднем може подолати більшу відстань на одному заправленні порівняно з автомобілем на бензині або дизелі. У результаті витрати на паливо можуть бути значно знижені.

Але поводитися з цим паливом високої щільності енергії дуже складно. Проблема виникає через простір і вагу, необхідні для зберігання водню. У стаціонарному сховищі це навряд чи є проблемою, але в електричних автомобілях на паливних елементах простір і вага дуже обмежені.

Для зберігання водню в рідкому вигляді знадобляться «гігантські резервуари». Якщо його зберігати в газоподібному стані, знадобляться «ще більші» резервуари.

За об'ємом рідкий водень має нижчу щільність енергії порівняно з бензином (8 МДж/л порівняно з 32 МДж/л). У результаті для зберігання корисної кількості водню наразі потрібні великі контейнери. Проте на основі маси (на відміну від об'єму) ситуація з щільністю енергії є протилежною. Водень має майже втричі більший енергетичний вміст, ніж бензин – 120 МДж/кг для водню проти 44 МДж/кг для бензину [21]. *Тобто, умовно кажучи, 1 кг водню містить приблизно стільки ж енергії, скільки 3,2 кг бензину. Отже, за описаних умов та сьогоденнішніх цін все одно використання водневих паливних елементів коштує в 1,5-2,5 рази дорожче.*

Швидкість, з якою розробляються нові технології для вирішення цієї

проблеми, означає, що водень цілком може піти так само, як скраплений природний газ, який уже транспортує більш щільну форму джерела енергії у величезних комерційних масштабах.

Глобальне економічне зростання, збільшення чисельності населення та розвиток технологій призводять до збільшення світового попиту на первинну енергію. Враховуючи, що більша частина цієї енергії наразі постачається за рахунок викопного палива, викидається значна кількість парникових газів, що сприяє зміні клімату.

Побічні продукти згоряння викопного палива певною мірою залежать від конкретного палива та способу його спалювання. Типові побічні продукти включають таке:

Таблиця 2

Особливості створення вартості зеленого водню*

Класичний водневий квадрат	Виробництво	<ol style="list-style-type: none"> 1. Водень не існує у вільній формі в природі, і його потрібно виробляти. 2. Процес виробництва водню несе витрати на виробництво, не будучи природним джерелом, що робить його ціну в 3 рази вищою, ніж викопне паливо. Слід також враховувати, що зберігання може ще більше збільшити його вартість, головним чином, якщо воно здійснюється за технологіями високого тиску. 3. Водень за умов навколишнього середовища є газом, а отже, має низьку об'ємну густину. Для виробництва такої ж кількості енергії потрібен об'єм, більш ніж у 3000 разів, ніж у інших видів рідкого палива. Крім того, об'єм водню необхідно зменшити, щоб його було легко зберігати та транспортувати. 4. Займистість водню вища, ніж інших видів палива, що ставить під сумнів його безпеку. Крім того, це задушливий газ; отже, це може призвести до задухи в результаті зниження концентрації кисню в повітрі.
	Зберігання	<ol style="list-style-type: none"> 1. Стиснений водень. 2. Криогенний стиснений водень. 3. Рідкий водень. 4. Твердотільні накопичувачі водню
	Транспортування (безпека)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Транспортування трубопроводами подібно до природного газу. 2. Транспортування в спеціалізованих контейнерах високого тиску. Разом із цим йде вузькоспеціалізоване обладнання та транспорт.
	Використання	<ol style="list-style-type: none"> 1. У вигляді запатентованої суміші водню та природного газу (гітан), що сприяє зниженню еквівалента CO₂ і викидів NO_x в атмосферу. 2. У виробництві як паливо для промислових процесів, допомагаючи зменшити залежність від викопного палива та мінімізуючи викиди вуглецю (у чистому вигляді, у вигляді гітану та синтетичного газу, технології Power-to-X). 3. У виробництві як сировина для виробництва аміаку та добрив. 4. Транспортні засоби на водневих паливних елементах є чистою альтернативою двигунам внутрішнього згоряння. 5. Водень також може допомогти в секторі виробництва енергії. Коли виробництво енергії з відновлюваних джерел є високим, надлишок енергії з відновлюваних джерел може допомогти електролізу створити більше водню в екологічний спосіб.

*Складено авторами.

- чадний газ (CO),
- вуглекислий газ (CO₂),
- сірка,
- діоксид азоту (NO₂),
- оксид азоту (N₂O),
- летючі органічні сполуки,
- вуглеводні (HCs).

Вважається, що при спалюванні одного галона бензину виділяється ~ 8,8 кг CO₂. Це різко контрастує з воднем. Спалювання водню (H₂) з повітрям призведе лише до викидів NO_x, і існують методи, щоб уловити та мінімізувати це. Однак справжньою зіркою є водневий паливний елемент, де єдиним побічним продуктом роботи є водяна пара. Цю хімічно чисту воду можна злити в каналізацію, випустити назовні або навіть повторно використати для очищення підлоги в деяких приміщеннях.

Експерти та регулюючі органи погоджуються, що за належного поводження водень є набагато безпечнішим паливом, ніж те, що зараз використовується сьогодні. Фактично Управління з виробництва водню та паливних елементів Міністерства енергетики США заявило, що «кілька властивостей водню роблять його безпечнішим у поводженні та

використанні, ніж паливо, яке зазвичай використовується сьогодні», включаючи бензин, природний газ, уран, авіаційне паливо та дизельне паливо [22].

Технічний потенціал виробництва водню значно перевищує розрахунковий світовий попит (рис. 2). Країни, які найбільше здатні виробляти дешеву відновлювану електроенергію, матимуть найкраще місце для виробництва конкурентоспроможного екологічно чистого водню. Хоча сьогодні такі країни, як Чилі, Марокко та Намібія, є чистими імпортерами енергії, вони мають стати експортерами екологічно чистого водню. Реалізація потенціалу таких регіонів, як Африка, Америка, Близький Схід і Океанія, може обмежити ризик концентрації експорту, але багато країн потребуватимуть передавання технологій, інфраструктури та масштабних інвестицій.

Геополітика чистого водню, ймовірно, відбуватиметься на різних етапах. На початку 2020-х років розглядалась велика гонка за технологічне лідерство. Але очікується, що попит зросте лише в середині 2030-х років. До того часу зелений водень буде конкурувати за ціною з воднем з

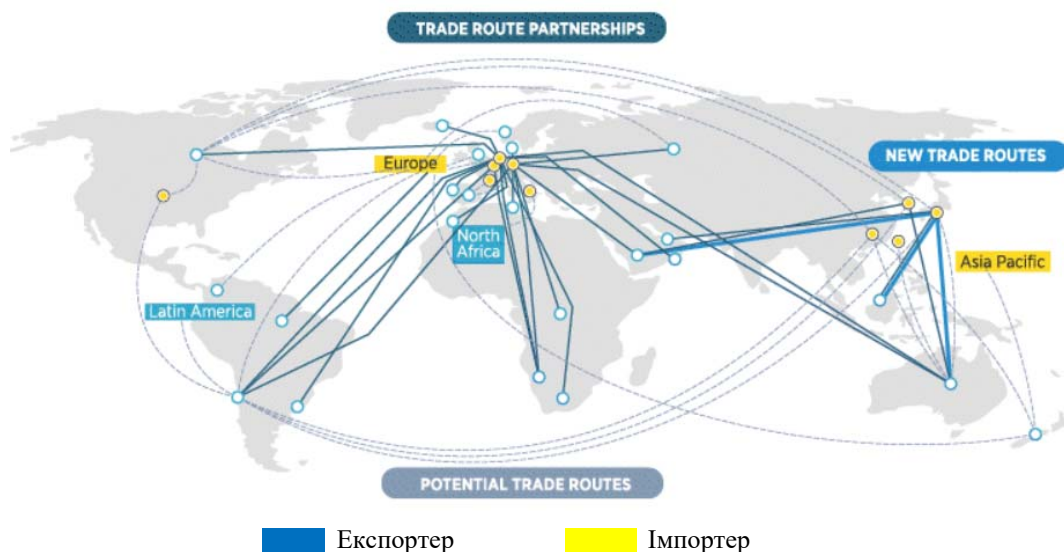


Рис. 2. Розширення мережі торговельних шляхів водню, планів і угод [2]

викопного палива в усьому світі. Зелений водень уже був доступним у Європі під час стрибка цін на природний газ у 2021 р. Реконструкція газопроводів, ймовірно, ще більше підвищить попит і полегшить торгівлю воднем.

Країни з достатнім потенціалом відновлюваних джерел енергії можуть стати місцями зеленої індустріалізації, використовуючи свій потенціал для залучення енергоємних галузей. Крім того, участь у ланцюжку вартості водню може підвищити економічну конкурентоспроможність. Виробництво такого обладнання, як електролізери та паливні елементи зокрема, може сприяти розвитку бізнесу. Китай, Японія та Європа вже створили перевагу у виробництві, але інновації формуватимуть поточний виробничий ландшафт.

Висновки. Виробництво зеленого водню з відновлюваних джерел енергії розглядається як потенційне рішення для досягнення мети скорочення викидів вуглецю в промисловості, сприяння розвитку відновлюваних джерел енергії та забезпечення енергетичної безпеки для країн. Застосування екологічно чистого водню в різних секторах також може принести багато екологічних переваг порівняно з воднем, виробленим з джерел викопного палива. Однак для того, щоб побудувати цей потенційний ринок зеленого водню в країнах по всьому світу, наразі необхідно вирішити основні проблеми. Ці виклики включають:

1. Поточні витрати на виробництво екологічно чистого водню в поєднанні з додатковими витратами на зберігання та транспортування водню до місць споживання все ще вищі, ніж інші форми водню.

2. Майбутній попит на зелений водень не гарантований.

3. Необхідно оцінити вплив проєктів зеленого водню на водні та земельні ресурси, що використовуються.

4. Міжнародні стандарти та правила залишаються неадекватними та непослідовними.

5. Слід розглянути громадське визнання проєктів зеленого водню.

Концепція водневої економіки як вирішення наших енергетичних потреб останнім часом викликала великий інтерес. Воднева економіка означає перехід від традиційних енергетичних систем на викопному паливі до більш чистого, стійкого та відновлюваного джерела енергії. Витрати на виробництво зеленого водню залишаються високими, але вони знижуватимуться з розвитком технологій. Теоретично водень можна використовувати для різноманітних цілей, але важко оцінити найімовірніші основні застосування через десятиліття, навіть якщо припустити стабільне зниження цін. Наразі понад 90% водню у світі використовується лише для трьох промислових застосувань: для зниження вмісту сірки в дизельному паливі на нафтопереробних заводах; для виробництва метанолу, який використовується в змішувачах палива і для виробництва аміаку для добрив та хімікатів.

Ланцюжок створення вартості водню розглядається з позиції класичного водневого квадрата, і в ньому можна виокремити такі елементи: верхні (виробництво), проміжні (зберігання та транспортування) і нижні (кінцеве споживання). Процес виробництва водню несе витрати на виробництво, оскільки, не будучи природним джерелом, водень за ціною в 3 рази дорожчий, ніж викопне паливо. Слід також враховувати, що зберігання та транспортування може ще значно збільшити вартість водню як продукту. Таким чином, зберігання та транспортування запасів водню становить значні проблеми. При цьому водень має майже втричі більший енергетичний вміст, ніж транспортне паливо. Але навіть за цих обставин, за сьогоdnішніх умов та цін, все одно використання водню майже втричі дорожче, ніж використання інших видів викопного палива. Треба також зазначити, що при спалюванні, наприклад, одного галона бензину виділяється ~ 8,8 кг CO₂. З іншого боку транспортні засоби на водневих паливних елементах є чистою альтернативою двигунам внутрішнього

згоряння. Вони поєднують кисень і водень, що створює електричний заряд, який живить акумуляторну батарею, що живить електродвигун, а у викидних газах присутня лише водяна пара. Таким чином,

у виробництві водень може бути чистим і ефективним паливом для промислових процесів, зменшуючи залежність від викопного палива та мінімізуючи викиди вуглецю.

Список використаної літератури

1. Bhavikkumar Mahant, Praveen Linga, Rajnish Kumar. Hydrogen Economy and Role of Hythane as a Bridging Solution: A Perspective Review. *Energy & Fuels*. Vol 35. Issue 19. 2021. URL: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.energyfuels.1c02404>
2. Geopolitics of the Energy Transformation: The Hydrogen Factor. The report of IRENA. 2022. 118 p.
3. Dimitriou P., Javaid R. A review of ammonia as a compression ignition engine fuel. *International Journal of Hydrogen Energy*. Volume 45, Issue 11. 2020. P. 7098-7118.
4. Gupta K.K., Rehman A., Sarviya R.M. Bio-fuels for the gas turbine: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volume 14. Issue 9. 2010, P. 2946-2955.
5. Chai W.S., Bao Yu., Jin P., Tang Gu., Zhou L. A review on ammonia, ammonia-hydrogen and ammonia-methane fuels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volume 147. 2021. 111254.
6. Subraveti S.G., Pai K.N., Rajagopalan A.K., Wilkins N.S., Rajendran A., Jayaraman A., Alptekin G. Cycle design and optimization of pressure swing adsorption cycles for pre-combustion CO₂ capture. *Applied Energy*. Volume 254. 2019. 113624.
7. Zhang Sh., Shen Ya., Wang L., Chen J., Lu Yo. Phase change solvents for post-combustion CO₂ capture: Principle, advances, and challenges. *Applied Energy*. Volume 239. 2019. P. 876-897.
8. Chen Q., Rosner F., Rao A., Samuelson S., Jayaraman A., Alptekin G. Simulation of elevated temperature solid sorbent CO₂ capture for pre-combustion applications using computational fluid dynamics. *Applied Energy*. Volume 237. 2019, P. 314-325.
9. General Electric Company. ANNUAL REPORT 2022. 101 p.
10. Pashchenko D. Green hydrogen as a power plant fuel: What is energy efficiency from production to utilization? *Renewable Energy*. Volume 223. 2024. 120033.
11. Howells R., James L. Hydrogen: "The most dumb thing I could possibly imagine for energy storage"- Is Elon Musk right? 2022. URL: <https://blog.burges-salmon.com/post/102hpr/hydrogen-the-most-dumb-thing-i-could-possibly-imagine-for-energy-storage-is-e>
12. Hydrogen station compression, storage, and dispensing technical status and costs: systems integration. G. e. a. Parks. National Renewable Energy Laboratory. 2014.
13. Current Status of Hydrogen Liquefaction Costs. DOE. 2019. URL: https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/19001_hydrogen_liquefaction_costs.pdf.
14. Green Hydrogen Supply: A Guide to Policy Making. IRENA. 2021.
15. European Hydrogen Backbone. E. F. B. G. G. N. O. O. S. S. T. Enagás 2020.
16. Water for the Hydrogen Economy. K. M. D. P. K. S. Rain Saulnier. 2020.
17. Bukowski M. Green hydrogen – hype or beacon of hope? 2022.
18. Hydrogen Storage. Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. (n.d.). Official website. URL: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage>
19. Ulf Bossel, Baldur Eliasson. Energy and the Hydrogen Economy. URL: https://afdc.energy.gov/files/pdfs/hyd_economy_bossel_eliasson.pdf
20. Pedro J. Megía, Arturo J. Vizcaíno, José A. Calles, Alicia Carrero. Hydrogen Production Technologies: From Fossil Fuels toward Renewable Sources. A Mini Review. *Energy & Fuels*. Vol 35. Issue 20. 2021. 16403–16415. URL: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.energyfuels.1c02501?ref=recommended>

21. Tom DiChristopher. Hydrogen technology faces efficiency disadvantage in power storage race. 2021. URL: <https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/news-insights/latest-news-headlines/hydrogen-technology-faces-efficiency-disadvantage-in-power-storage-race-65162028>
22. Safe Use of Hydrogen. Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. (n.d.). Official website. URL: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/safe-use-hydrogen>

References

1. Bhavikkumar Mahant, Praveen Linga, Rajnish Kumar. (2021). Hydrogen Economy and Role of Hythane as a Bridging Solution: A Perspective Review. *Energy & Fuels*. Vol 35. Issue 19. Available at: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.energyfuels.1c02404>
2. Geopolitics of the Energy Transformation: The Hydrogen Factor. The report of IRENA. 2022. 118 p.
3. Dimitriou, P., Javaid, R. (2020). A review of ammonia as a compression ignition engine fuel. *International Journal of Hydrogen Energy*. Volume 45, Issue 11. P. 7098-7118.
4. Gupta, K.K., Rehman, A., Sarviya, R.M. (2010). Bio-fuels for the gas turbine: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volume 14. Issue 9. P. 2946-2955.
5. Chai, W.S., Bao, Yu., Jin, P., Tang, Gu., Zhou, L. (2021). A review on ammonia, ammonia-hydrogen and ammonia-methane fuels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volume 147. 111254.
6. Subraveti, S.G., Pai, K.N., Rajagopalan, A.K., Wilkins, N.S., Rajendran, A., Jayaraman, A., Alptekin, G. (2019). Cycle design and optimization of pressure swing adsorption cycles for pre-combustion CO₂ capture. *Applied Energy*. Volume 254. 113624.
7. Zhang, Sh., Shen, Ya., Wang, L., Chen, J., Lu, Yo. (2019). Phase change solvents for post-combustion CO₂ capture: Principle, advances, and challenges. *Applied Energy*. Volume 239. P. 876-897.
8. Chen, Q., Rosner, F., Rao, A., Samuelsen, S., Jayaraman, A., Alptekin, G. (2019). Simulation of elevated temperature solid sorbent CO₂ capture for pre-combustion applications using computational fluid dynamics. *Applied Energy*. Volume 237. P. 314-325.
9. General Electric Company. ANNUAL REPORT 2022. 101 p.
10. Pashchenko, D. (2024). Green hydrogen as a power plant fuel: What is energy efficiency from production to utilization? *Renewable Energy*. Volume 223. 120033.
11. Howells, R., James, L. (2022). Hydrogen: “The most dumb thing I could possibly imagine for energy storage”- Is Elon Musk right? Available at: <https://blog.burges-salmon.com/post/102hpr/hydrogen-the-most-dumb-thing-i-could-possibly-imagine-for-energy-storage-is-e>
12. Hydrogen station compression, storage, and dispensing technical status and costs: systems integration. G. e. a. Parks. National Renewable Energy Laboratory. 2014.
13. Current Status of Hydrogen Liquefaction Costs. DOE. 2019. Available at: https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/19001_hydrogen_liquefaction_costs.pdf.
14. Green Hydrogen Supply: A Guide to Policy Making. IRENA. 2021.
15. European Hydrogen Backbone. E. F. B. G. G. N. O. O. S. S. T. Enagás 2020.
16. Water for the Hydrogen Economy. K. M. D. P. K. S. Rain Saulnier. 2020.
17. Bukowski, M. Green hydrogen – hype or beacon of hope? 2022.
18. Hydrogen Storage. Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. (n.d.). Official website. Available at: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage>
19. Ulf Bossel, Baldur Eliasson. Energy and the Hydrogen Economy. Available at: https://afdc.energy.gov/files/pdfs/hyd_economy_bossel_eliasson.pdf
20. Pedro J. Megía, Arturo J. Vizcaíno, José A. Calles, Alicia Carrero. (2021). Hydrogen Production Technologies: From Fossil Fuels toward Renewable Sources. A Mini Review.

Energy & Fuels. Vol 35. Issue 20. 2021, 16403–16415. Available at: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.energyfuels.1c02501?ref=recommended>

21. Tom DiChristopher. (2021). Hydrogen technology faces efficiency disadvantage in power storage race. Available at: <https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/news-insights/latest-news-headlines/hydrogen-technology-faces-efficiency-disadvantage-in-power-storage-race-65162028>

22. Safe Use of Hydrogen. Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. (n.d.). Official website. Available at: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/safe-use-hydrogen>

FORMATION OF VALUE CHAINS FOR GREEN HYDROGEN

Svitlana O. Fedulova, Alfred Nobel University, Dnipro (Ukraine).

E-mail: fedulova.s@duan.edu.ua

Oleksandr A. Pivovarov, Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro (Ukraine).

E-mail: apivo@ua.fm

Andrii Ya. Kalynovskyi, National University of Civil Protection of Ukraine, Kharkiv (Ukraine).

E-mail: ugzu.iart@gmail.com

<https://doi.org/10.32342/3041-2137-2025-1-62-10>

Key words: *hydrogen economy, green hydrogen, energy transition, value creation chains, carbon neutrality, energy security*

JEL classification: *O13, O14, P28, Q56, Q57*

The world is entering an unprecedented period when our energy systems will begin to radically change. The article is devoted to the issue of determining the features of the formation of green hydrogen value chains. The main idea of the study was to identify and describe the potential opportunities for the rapid growth of the global hydrogen economy and the features of value creation for green hydrogen in the specified conditions of the global hydrogen economy. It has been noted that the delay in the development of a systematic and mature hydrogen economy is mainly due to difficult storage conditions and the safety aspect of its transportation.

It has been substantiated that the green hydrogen value chain can be divided into the following elements: upstream (production), intermediate (storage and transportation), and downstream (end consumption). Each of these components of the hydrogen value chain needs to address its own technical and socio-economic challenges. The hydrogen production process carries production costs, as it is not a naturally occurring source, making it three times more expensive than fossil fuels. It should also be considered that storage and transportation can still significantly increase the cost of hydrogen as a product.

Thus, the storage and transportation of hydrogen reserves present significant challenges. The study analytically proves that, even though hydrogen has almost three times the energy content of transportation fuel, it is still almost three times more expensive to use than other fossil fuels under today's conditions and prices. At the same time, the article notes that molecular hydrogen is the most optimistic solution for achieving a carbon-neutral energy economy, and it requires scientific intervention for its production, storage, and transportation.

Therefore, the production of green hydrogen from renewable energy sources is considered a potential solution to achieving the goal of reducing carbon emissions in industry, promoting the development of renewable energy sources, and ensuring energy security for countries. The study presents potential features of green hydrogen value creation and describes potential ways of using green hydrogen in the economy in the near future. In the near future, we can expect the use of green hydrogen in the form of a patented mixture of hydrogen and natural gas (Nythane); in production as

a fuel for industrial processes, helping to reduce dependence on fossil fuels and minimizing carbon emissions (Methane and synthetic gas, Power-to-X technologies); in production as a raw material for the production of ammonia and fertilizers; as hydrogen fuel cells for cars; as well as in the energy production sector. When renewable energy production is high, excess renewable energy can help electrolysis create more hydrogen in an environmentally friendly way.

Одержано 15.06.2024.