

## ГЛОБАЛЬНІ ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ВОДНЕВИХ ТЕХНОЛОГІЙ У ПРОМИСЛОВОСТІ

©2020 ТАЩЕЄВ Ю. В., ВОЙТКО С. В., ТРОФИМЕНКО О. О., РЕПКІН О. О., КУДРЯ Т. С.

УДК 330.34:661.961  
JEL: Q42; L19

### Тащев Ю. В., Войтко С. В., Трофименко О. О., Репкін О. О., Кудря Т. С. Глобальні тенденції розвитку водневих технологій у промисловості

У статті визначено основні передумови та проаналізовано тенденції використання водневих технологій з урахуванням енергетичного потенціалу та екологічних особливостей водню. Розглянуто основні технології виробництва водню та визначено перспективи та недоліки їх використання. Проведено аналіз капітальних витрат і вартості водню при різних способах його отримання. Проведено порівняння розподіленого та централізованого виробничих шляхів. Проаналізовано принципи роботи лужного, PEM і SOE електролізу. На основі аналізу, систематизації та узагальнення досліджень багатьох вчених була проаналізована потенційна можливість переходу до водневої економіки. У результаті дослідження електролізерів різних технологічних типів здійснено порівняльний аналіз у вигляді матриці недоліків і переваг. Визначені основні фактори, які впливають на вартість «зеленого» водню, а саме: енергетичний потенціал відновлюваних джерел; вартість основного та допоміжного обладнання; наявність і вартість водного ресурсу; вартість земельних ділянок для розміщення основного та допоміжного обладнання; операційні витрати. Наведено прогностичні значення техніко-економічних показників виробництва «зеленого» водню, зокрема: капітальних витрат, операційних витрат, ефективності системи та ін. Дослідження прийнятих стратегій розвитку водневої економіки в розвинених країнах дозволило зробити висновок про те, що використання водню є перспективним низьковуглецевим рішенням в енергетичній сфері. Виявлено, що виробництво водню доцільно проводити в тісному поєднанні з відновлюваною енергетикою, що надасть змогу отримати економічний та екологічний ефекти. Перспективою подальшого дослідження в даному напрямку є розробка стратегії переходу на водневі технології України на основі економіко-математичного моделювання.

**Ключові слова:** воднева економіка, «зелений» водень, відновлювані джерела енергії, стратегія, вартість виробництва водню.

**DOI:** <https://doi.org/10.32983/2222-4459-2020-8-103-114>

**Рис.:** 2. **Табл.:** 4. **Бібл.:** 36.

**Тащев Юрій Вікторович** – кандидат економічних наук, старший науковий співробітник відділу № 1 комплексних енергосистем, Інститут відновлюваної енергетики НАН України (вул. Гната Хоткевича, 20а, Київ, 02094, Україна)

**E-mail:** [tascheevyuri@gmail.com](mailto:tascheevyuri@gmail.com)

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-0408-4315>

**Researcher ID:** <http://www.researcherid.com/M-2048-2014>

**Войтко Сергій Васильович** – доктор економічних наук, професор, завідувач кафедри міжнародної економіки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (просп. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна)

**E-mail:** [s.voytko@kpi.ua](mailto:s.voytko@kpi.ua)

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-2488-3210>

**Researcher ID:** <http://www.researcherid.com/I-2302-2018>

**Трофименко Олена Олександрівна** – кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри теоретичної та прикладної економіки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (просп. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна)

**E-mail:** [o.o.trofymenko@gmail.com](mailto:o.o.trofymenko@gmail.com)

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-2339-0377>

**Репкін Олександр Олександрович** – голова Енергетичної асоціації «Українська Воднева Рада» (вул. Лаврська, 20, Київ, 01015, Україна), голова наглядової ради ТОВ «Токмак Солар Енерджі» (вул. Гоголя, 201а, Токмак, 71708, Україна)

**E-mail:** [riepkin@hydrogen.ua](mailto:riepkin@hydrogen.ua)

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-3448-6729>

**Кудря Тетяна Степанівна** – науковий співробітник відділу № 2 сонячної енергетики, Інститут відновлюваної енергетики НАН України (вул. Гната Хоткевича, 20а, Київ, 02094, Україна)

**E-mail:** [1144ktc@gmail.com](mailto:1144ktc@gmail.com)

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0003-4252-2969>

UDC 330.34:661.961  
JEL: Q42; L19

### Tascheiev Yu. V., Voitko S. V., Trofymenko O. O., Riepin O. O., Kudria T. S. Global Trends in the Development of Hydrogen Technologies in Industry

The article defines the main prerequisites and analyzes trends in the use of hydrogen technologies taking into account energy potential and ecological features of hydrogen. The main technologies of hydrogen production are considered, the prospects and disadvantages of their use are determined. The capital expenditures and the cost of hydrogen in different ways of obtaining it are analyzed. The comparison of distributed and centralized production routes is carried out. The principles of alkaline, REM and SOE electrolyses are analyzed. On the basis of analysis, systematization and generalization of the studies of numerous scholars, the potential possibility of transition to hydrogen economy is analyzed. As a result of the study on the electrolysis of different technological types, a comparative analysis is carried out in the form of a matrix of advantages and disadvantages. The main factors that affect the cost of «green» hydrogen are defined as follows: energy potential of renewable sources; cost of basic and auxiliary equipment; availability and cost of water resource; cost of land plots for placing basic and auxiliary equipment; operating costs. The predictive values of the technological and economic indicators of the «green» hydrogen production are presented, in particular: capital expenditures, operating costs, system efficiency, etc. Research of the adopted strategies for the development of hydrogen economy in developed countries allows to conclude that hydrogen use is a promising low-carbon solution in the energy sector. It is identified that hydrogen production is advisable to carry out in close conjunction with renewable energetics, which will enable to obtain economic and environmental effects. Prospect for further research in this direction is the development of a strategy for transition to hydrogen technologies of Ukraine on the basis of economic and mathematical modeling.

**Keywords:** hydrogen economy, «green» hydrogen, renewable energy sources, strategy, cost of hydrogen production.

**Fig.:** 2. **Tabl.:** 4. **Bibl.:** 36.

**Tashcheiev Yurii V.** – PhD (Economics), Senior Research Fellow of the Department No. 1 of Integrated Power Systems, Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine (20a Hnata Khotkevycha Str., Kyiv, 02094, Ukraine)

**E-mail:** tashcheivyuri@gmail.com

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-0408-4315>

**Researcher ID:** <http://www.researcherid.com/M-2048-2014>

**Voitko Serhii V.** – D. Sc. (Economics), Professor, Head of the Department of International Economics, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (37 Peremohy Ave., Kyiv, 03056, Ukraine)

**E-mail:** s.voytko@kpi.ua

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-2488-3210>

**Researcher ID:** <http://www.researcherid.com/l-2302-2018>

**Trofymenko Olena O.** – PhD (Economics), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Theoretic and Applied Economics, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (37 Peremohy Ave., Kyiv, 03056, Ukraine)

**E-mail:** o.o.trofymenko@gmail.com

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-2339-0377>

**Riepink Oleksandr O.** – Chief of the Energy Association "Ukrainian Hydrogen Council" (20 Lavrska Str., Kyiv, 01015, Ukraine), Chairman of the Supervisory Board of the Tokmak Solar Energy LLC (201a Hoholia Str., Tokmak, 71708, Ukraine)

**E-mail:** riepkin@hydrogen.ua

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-3448-6729>

**Kudria Tetiana S.** – Research Associate of the Department No. 2 of Solar Energy, Institute of Renewable Energy of the National Academy the Sciences of Ukraine (20a Hnata Khotkevycha Str., Kyiv, 02094, Ukraine)

**E-mail:** 1144krc@gmail.com

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0003-4252-2969>

#### СКОРОЧЕННЯ:

**SMR** – (Steam methane reformer) парової метановий реформер;

**CCS** – (Carbon capture and storage) уловлювання та зберігання вуглецю;

**GC** – (Coal Gasification) газифікація вугілля;

**ATR** – (Auto thermal reforming) автотермічний риформінг;

**PEM** – (Polymer-electrolyte membrane) полімерна електролітна мембрана;

**SOE** – (Solid oxide electrolyzers) твердооксидні електролізери;

**CAPEX** – (Capital Expenditures) капітальні витрати;

**OPEX** – (Operational Expenditures) операційні витрати;

**WACC** – (Weighted Average Capital Costs) середньозважені капітальні витрати;

**WE** – (Water Electrolysis) електроліз води;

**FCV** – (Fuel cell vehicle) транспортний засіб на паливних елементах.

**В**одень є унікальним хімічним елементом, який може використовуватися в різних сферах, включаючи хімічні та промислові процеси, для транспорту та опалення – як паливо, у процесі виробництва електроенергії – для акумулювання енергії, та в інших сферах [1].

За оцінками вчених [2], використання водню є одним із більш перспективних низьковуглеводних енергетичних рішень.

Міжнародне агентство Bloomberg NEF (BNEF) у своєму дослідженні «Воднева економіка: багатооби-

цяючий шлях до декарбонізації» прогнозує, що «зелений» водень може забезпечити чверть кінцевого споживання енергії на Землі до 2050 р. За результатами дослідження також прогнозовано, що до 2050 р. поновлюваний водень можливо буде виробляти в більшості регіонів світу за 0,8–1,6 дол. США за кг [4].

**Г**алузеві гравці почали впроваджувати на ринок системи водневих паливних елементів, включаючи електромобілі на паливних елементах і комбіновані теплові та енергетичні пристрої. Використання водню в масштабах енергосистеми потребує вирішення проблем, пов'язаних з виробництвом, зберіганням і розподілом чистого водню. Так, для реалізації потенціалу водню в усіх секторах економіки доцільне посилення державної підтримки в кооперації з промисловістю та науковими колами [5].

Відновлювані джерела енергії, такі як сонячне випромінювання, вітер, біомаса, гідроенергія та геотермальна енергія, істотно зменшують викиди парникових газів порівняно з викопними вуглеводневими ресурсами. Проте багато з них є нестабільними в часовому проміжку, їм притаманні як добові, так і сезонні коливання, у результаті чого відновлювана енергетика не має можливості самостійно забезпечити безперервне постачання енергії [3].

Колівання обсягів виробленої енергії, що генерують вітрові або сонячні фотоелектричні джерела, характеризує відому проблему балансування пропозиції та попиту на електроенергію в режимі реального часу [15]. Згладжування піків і провалів потребує наявності ефективних засобів акумулювання енергії. Енергія може накопичуватися за допомогою вико-

ристання фізичних законів зі збільшенням масштабності зберігання, а саме: механічна, теплова, електрохімічна та хімічна енергії. Кожен принцип накопичування та зберігання має свої переваги та недоліки, що пов'язані, наприклад, зі щільністю енергії, потужністю, вартістю та потенціалом для нарощування [14].

Одним із рішень є вироблення водню шляхом електролізу в момент надлишку генерації та подальше використання отриманого водню в паливному елементі для виробництва електроенергії в періоди низької генерації електроенергії або пікового навантаження, або в транспортних засобах разом із паливними елементами.

Сьогодні низка країн у своїх стратегіях розвитку передбачають перехід на водневі технології в енергетичній і транспортній сферах [16; 17].

Перехід економіки на водневі технології потребує не лише нових технологічних рішень і підходів, а й поглиблених наукових досліджень, що складаються з інженерних рішень, глибокого економічного аналізу та математичного моделювання трансформаційних процесів.

У березні 2020 р. Європейська комісія презентувала Нову Промислову Стратегію ЄС, яка спрямована на реалізацію трьох ключових пріоритетів, зокрема перетворення Європи на кліматично-нейтральну до 2050 р. Також 18 червня 2020 р. Європейська Комісія ухвалила прийняття Європейським Парламентом Регламенту таксономії – ключового законодавчого акта, який сприятиме європейській «зеленій угоді», стимулюючи інвестиції приватного сектора в «зелені» та стійкі проекти. Сьогодні в Україні триває процес доопрацювання Стратегії розвитку промислового комплексу до 2025 р. з огляду на пріоритети нової промислової стратегії ЄС, саме тому доцільно визначити основні економічні засади використання водневих технологій у різних сферах промисловості.

З розвитком індустріалізації виробляється більше штучного водню, який відіграє важливу роль в економіці. Водень має вищу питому масову щільність енергії серед усіх видів палива (120 МДж/кг при низькій теплотворній здатності), таким чином, він вважається ідеальним середовищем енергії для зберігання, передачі та використання [17]. У табл. 1 наведені основні фізичні властивості даного елемента.

Зазначимо, що існує багато технологій отримання водню, які умовно можна розділити на «сірі» та «зелені». До «сірих» відноситься виробництво водню з використанням викопної сировини, паровий метановий риформер, газифікація вугілля, автотермічний риформінг та ін. «Зелені» технології полягають у використанні відновлюваних джерел і води, наприклад:

- ✦ біологічне розщеплення води;
- ✦ ферментація, конверсія біомаси та відходів;
- ✦ фотоелектрохімічне розщеплення води;
- ✦ сонячне термальне розщеплення води;

- ✦ електроліз за рахунок енергії відновлюваних джерел і т. п. [6–13].

Таблиця 1

Характеристики водню

Характеристика	Одиниця	Значення
Густина	kg/m <sup>3</sup>	0.0838
Вища теплота згоряння / Рідкий водень	MJ/kg	141,90–119,90
Вища теплота згоряння / Стиснутий водень	MJ/m <sup>3</sup>	11,89–10,05
Точка кипіння	К	20,41
Точка замерзання	К	13,97
Густина рідкого водню	kg/m <sup>3</sup>	70,8
Коефіцієнт дифузії	см <sup>2</sup> /с	0,61
Питома теплоємність	kJ/kg K	14,89
Межі запалювання суміші в повітрі	% (об'єм)	4–75
Мінімальна енергія займання воднево-повітряної суміші	МілліДж	0,02
Температура запалювання	К	585,00
Температура полум'я на повітрі	К	2318,00
Енергія у вибуху	kJ/g TNT	58,823
Коефіцієнт випромінювання полум'я	%	17–25
Стехіометрична суміш на повітрі	%	29,53
Повітряно-паливна стехіометрія	kg/kg	34,30/1
Швидкість горіння	см/с	2,75

Джерело: узагальнено авторами

Виробництво водню має забезпечувати екологічну стійкість, щоб не призводити до проблем, які пов'язані з традиційними викопними видами палива. У багатьох роботах досліджується вплив на навколишнє середовище різних методів виробництва водню, зокрема заснованих на невідновлюваних і відновлюваних джерелах енергії [18; 19]. Наслідки їх впливу оцінюються з точки зору викидів вуглекислого газу при виробництві 1 кг водню. Зокрема, для парової конверсії метану (природного газу) потрібно всього 4,5 кг води на кожен кілограм водню, але з процесу виділяється 5,5 кг CO<sub>2</sub> [20].

Основними недоліками виробництва водню за допомогою SMR, газифікації вугілля та часткового окислення вуглеводнів є викиди CO<sub>2</sub>. Виробництво H<sub>2</sub> при газифікації вугілля призводить до високих викидів (29,33 кг CO<sub>2</sub> / кг H<sub>2</sub>). Електроліз вважається єдиним процесом, який не супроводжується викидами CO<sub>2</sub>. Однак це вважається таким тільки тоді, коли

електростанції використовують відновлювані джерела енергії для вироблення необхідної електроенергії.

Існують рішення для зменшення викидів CO<sub>2</sub>, такі як відділення та секвестрація діоксиду вуглецю, що утворюється у процесі захоплення водню. Проте уловлювання CO<sub>2</sub> на даному етапі технічно та комерційно необґрунтовано, додаткові витрати на логістику уловлювання, зберігання та транспортування CO<sub>2</sub> збільшують загальну вартість виробництва водню з викопного палива, загальні витрати на виробництво водню збільшуються приблизно на 3–5% у разі реформування природного газу та на 10–15% у разі газифікації вугілля [20].

Для якісного оцінювання витрат, отриманих за допомогою кожного методу виробництва водню (на основі відновлюваних джерел енергії та викопного палива), у табл. 2 наведено такі показники: джерело енергії, вартість сировини та капітальні вкладення, вартість виробництва водню (у розрахунку на 1 кг водню). Зазначимо, що існують деякі невизначеності щодо вартості виробництва водню. Ця вартість суттєво залежить від рівня розвитку технології виробництва, наявності існуючої інфраструктури та ціни на сировину. Згідно з табл. 2 більш фінансово вигідними способами отримання водню є парова конверсія метану, газифікації та газифікації біомаси. Ядерні термохімічні цикли (SueCl і Sel) є також економічно конкурентоздатними порівняно з виробництвом водню з викопного палива та біомаси. Вітровий і сонячний електролізи дають вищі виробничі витрати на 1 кг водню. Оскільки однією із основних переваг електролізу є його локальне застосування, при розрахунку вартості електролізу роблять припущення про розподілене дрібномасштабне виробництво.

Вартість водню суттєво залежить від масштабу виробництва, що потрібно враховувати при моделюванні переходу енергетичної системи на водневі технології.

Загалом, можна виділити два виробничі шляхи, а саме: розподілений і централізований. Централізованим виробництвом, зазвичай, є великомасштабне виробництво водню, де його необхідно транспортувати від точки виробництва до споживача. Наприклад, вартість виробництва водню з природного газу за допомогою парової конверсії метану варіюється від 1,25 дол./кг для великих систем до 3,50 дол./кг для невеликих систем із ціною природного газу 0,3 дол./кг. Низка авторів вважають, що розподілене виробництво є більш імовірним шляхом розвитку водневого ринку в енергетичній системі. У цьому випадку водень повинен використовуватися поблизу місця виробництва [25]. Розподілена виробнича інфраструктура може складатися з установок для риформінгу природного газу або електролізерів, розташованих у місці використання, наприклад на заправній станції, або стаціонарної генерації електроенергії. Цей шлях

не потребує суттєвої інфраструктури постачання водню. Вартість децентралізованого виробництва H<sub>2</sub> може сьогодні перевищити 6 дол./кг (виробництво та розподіл водню). До переваг централізованого виробництва відноситься суттєва економія на масштабі, проте для того, щоб бути комерційно життєздатним виробництвом, доцільно розробити технології розподілу [25].

Хоча на даний час вуглеводні є основною сировиною, яка використовується для виробництва H<sub>2</sub>, необхідність у розширенні інтеграції відновлюваних технологій стане нагальною потребою. Оскільки викопне паливо скорочується, а зміна клімату в результаті антропогенного парникового ефекту стає однією з важливих проблем людства, то частка відновлюваних технологій у найближчому майбутньому зросте, а в довгостроковій перспективі очікується їх зростання порівняно з традиційними технологіями [22].

Виробництво поновлюваного водню відкриває можливості для моделі розподіленої мережі подачі водню, яка буде заснована на виробництві водню на локації споживача або за його межами. Електроенергія, що виробляється з поновлюваних джерел, може бути перетворена у водень за допомогою процесу електролізу. Фактично, щоб вивільнити 1 кг водню з 9 кг води, потрібно близько 55 кВт·год електроенергії [21].

Електролізери води поділяються на три основні категорії: 1) лужні, 2) полімерна електролітна мембрана (PEM) і 3) твердооксидні електролізери (SOE) (рис. 1).

Твердооксидні електролізери (SOE), зазвичай, працюють при температурі вище 500 °C, де вода знаходиться в газоподібному стані, лужні та PEM електролізери працюють у діапазоні низьких температур (зазвичай, нижче 100 °C), де вода – у стані рідини [26]. Для двох технологій – лужної та PEM – відмінності виникають залежно від типу електроліту, який використовується: рідкого (гідроксид калію) за використання лужної технології та твердої мембрани за використання електролізерів PEM [27].

У лужних електролізерах анодний і катодний електроди занурені в рідкий лужний електроліт, часто гідроксид калію. Діафрагма проникна для OH<sup>-</sup> між двома електродами та використовується для поділу продукту газів. У твердооксидних і PEM електролізерах роль газосепаратора виконують, відповідно, тверді електроліти: кераміка та полімер.

Кожен з типів електролізу має свої переваги та недоліки (табл. 3), але всі три технології привабливі та перспективні для застосування у сталій енергетиці. Лужний електроліз належним чином зарекомендував себе як ефективна комерційна технологія з такими постачальниками, як De Nora SAP, Norsk Hydro, Electrolyzer Corp, Teledyne Energy Systems и General Electric [28].

## Техніко-економічні показники різних процесів виробництва водню

Процес	Джерело енергії	Сировина	Капітальна вартість (млн \$ США)	Вартість водню (\$/кг)
SMR з CCS	Викопне паливо	Природний газ	226,4	2,27
SMR без CCS	Викопне паливо	Природний газ	180,7	2,08
GC з CCS	Викопне паливо	Вугілля	545,6	1,63
GC без CCS	Викопне паливо	Вугілля	435,9	1,34
ATR метану з CCS	Викопне паливо	Природний газ	183,8 <sup>(a)</sup>	1,48
Метановий піроліз	Внутрішньо-згенерована пара	Природний газ	–	1,59–1,70
Піроліз біомаси	Внутрішньо-згенерована пара	Дерев'яна біомаса	53,4–3,1 <sup>(б)</sup>	1,25–2,20
Газифікація біомаси	Внутрішньо-згенерована пара	Дерев'яна біомаса	149,3–6,4 <sup>(c)</sup>	1,77–2,05
Прямий біофотоліз	Сонячна	Вода + водорості	50 \$/m <sup>2</sup>	2,13
Непрямий біофотоліз	Сонячна	Вода + водорості	135 \$/m <sup>2</sup>	1,42
Темне бродіння	–	Органічна біомаса	–	2,57
Фото-бродіння	Сонячна	Органічна біомаса	–	2,83
Сонячний електроліз PV	Сонячна	Вода	12,0–54,5	5,78–23,27
Сонячний тепловий електроліз	Сонячна	Вода	421,0–22,1 <sup>(д)</sup>	5,10–10,49
Вітровий електроліз	Вітер	Вода	504,8–499,6 <sup>(e)</sup>	5,89–6,03
Ядерний електроліз	Ядерна	Вода	–	4,15–7,00
Ядерний термоліз	Ядерна	Вода	39,6–2107,6 <sup>(ж)</sup>	2,17–2,63
Сонячний термоліз	Сонячна	Вода	5,7–16,0 <sup>(з)</sup>	7,98–8,40
Фотоелектроліз	Сонячна	Вода	–	10,36

## Примітки:

(a) – базується на електростанції потужністю 600 МВт/год з капітальною вартістю \$306,35 / кВт/год;

(б) – капітальна вартість 53,4 млн дол. відповідає потужності заводу 72,9 тонн/добу; 3,1 млн дол. – 2,7 тонн/добу;

(c) – капітальна вартість 149,3 млн дол. відповідає виробничій потужності 139,7 тонн/добу; 6,4 млн дол. – 2 тонни/добу;

(д) – капітальна вартість 421 млн дол. відноситься до електролізу електростанції з продуктивністю вироблення 38,4 тонни Н<sub>2</sub> на добу; 22,1 млн дол. відповідає технології з продуктивністю вироблення 1,4 тонни на добу;

(e) – вартість 504,8 млн дол. Передбачає спільне виробництво електроенергії разом із воднем, тоді як 499,6 млн дол. – це вартість лише виробництва водню;

(ж) – капітальна вартість 39,6 млн дол. відповідає потужності заводу Cu-Cl 7 тонн/добу; 2107,6 млн дол. – 583 тонни/добу виробництва заводу S-1;

(з) – капітальна вартість 5,7 млн дол. відповідає потужності заводу 1,2 тонни/добу; 16 млн дол. – 6 тонн/добу виробництва.

Джерело: узагальнено авторами на основі [22–24].

За оцінками європейських експертів, ринок електролізерів в ЄС до 2030 р. зросте до 40 ГВт. Загальне виробництво водню у 2030 р. прогнозується 4,4 млн т, що еквівалентно 173 ТВт·год, або 25% від загального попиту на водень в ЄС (665 ТВт·год), як наведено у «Водній дорожній карті Європи» [29].

Деталізуємо перспективи виробництва водню з використанням відновлюваних джерел енергії та електролізу.

Так, реалізація концепції переходу на використання «зеленого» водню залежить від низки факторів, а саме: від енергетичного потенціалу відновлюваних джерел у даному регіоні; від вартості основного

та допоміжного обладнання; від наявності необхідного водного ресурсу в достатніх обсягах з урахуванням його вартості; а також від вартості земельних ділянок для розміщення основного та допоміжного обладнання (рис. 2).

Своєю чергою, всі ці фактори тією чи іншою мірою, безпосередньо або опосередковано в кінцевому рахунку впливають на вартість самого водню.

За оцінками європейських дослідників, у результаті технологічних розробок, з урахуванням масштабу та функції навченості, низьких витрат на виробництво електроенергії з відновлюваних джерел та інтегрування поновлюваних джерел з виробництвом

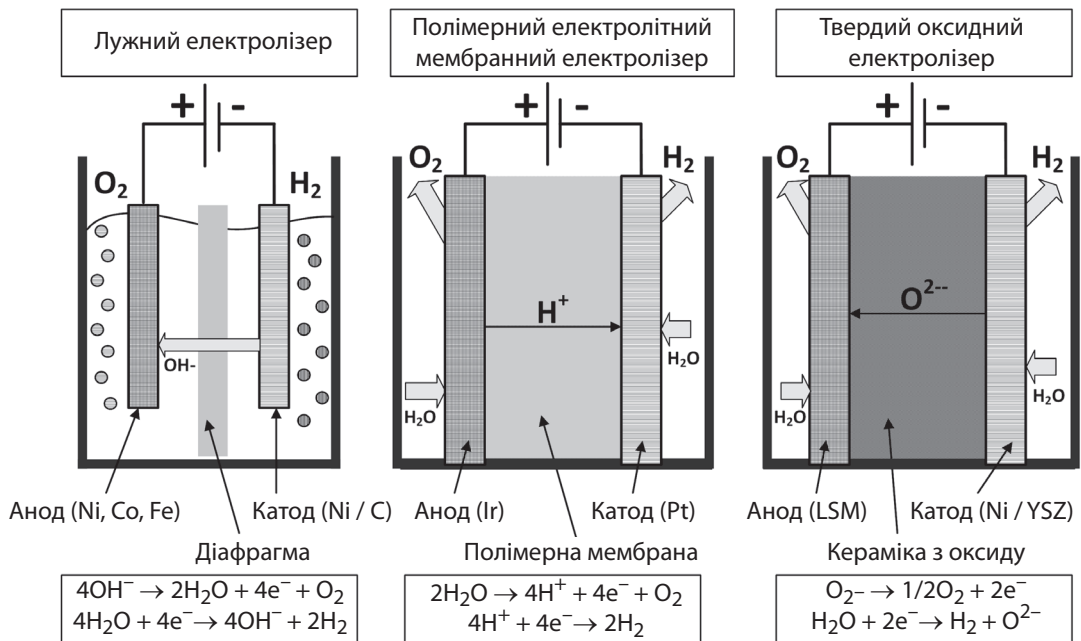


Рис. 1. Принципи роботи лужного, PEM і SOE електролізу

Джерело: складено за [26].

Таблиця 3

Матриця переваг і недоліків PEM і SOE електролізу

	Лужний	PEM
<b>Переваги</b>	<p>Нижче CAPEX / OPEX</p> <p>Зріла та перевірена технологія у розмірі декількох МВт для стаціонарної роботи</p> <p>Значний термін експлуатації стека</p>	<p>Короткий час відгуку в динамічній роботі</p> <p>Стабільний твердий електроліт</p> <p>Належні значення показників при частковій експлуатації</p> <p>Високий рівень чистоти водню</p>
<b>Недоліки</b>	<p>Менш стійкий рідкий електроліт</p> <p>Необхідність очищення водню для кінцевих цілей</p> <p>Більш тривалий час відклику</p> <p>Тривалий час холодного пуску</p>	<p>Вища CAPEX / OPEX</p> <p>Менший термін експлуатації штабеля</p> <p>Наявність металів платинової групи</p> <p>Менш зріла та перевірена технологія для використання у мегаватному обладнанні</p>

Джерело: складено на основі [28].

електроенергії та водню, все йде до того, що поновлюваний водень, що виробляється електролізерами, стане конкурентоспроможним з низьковуглецевим воднем до 2025 р. Передбачається, що низьковуглецевий водень, отриманий із природного газу за допомогою SMR (риформінгу з водяною парою) або ATR (автоматичного термічного риформінгу) з використанням CCS (уловлювання та зберігання вуглецю), в Європі буде коштувати від 1,5 до 2,0 євро/кг [30].

У 2025 р. поновлюваний водень стане конкурентоспроможним з низьковуглецевим воднем (1,5–2,0 євро/кг) або «сірим» воднем з урахуванням ціни на CO<sub>2</sub> – 50 євро за тону. Очікується, що у 2030 р. поновлюваний водень стане конкурентоспроможним порівняно із «сірим» воднем, з ціною 1,0–1,5 євро/кг (табл. 4).

тоспроможним порівняно із «сірим» воднем, з ціною 1,0–1,5 євро/кг (табл. 4).

До передумов розвитку водневої економіки відноситься необхідність вирішення низки проблем:

- ✦ *технічні проблеми*, такі як стабільність і надійність паливних елементів;
- ✦ *економічні проблеми*, пов'язані з витратами на системну інтеграцію та необхідну інфраструктуру та забезпечення ланцюга постачання для великомасштабного виробництва, транспортування водню;
- ✦ *фінансові проблеми* – підтримка технічних стандартів і правил.

Для реалізації переходу на водневу економіку низка країн затвердили водневі стратегії.

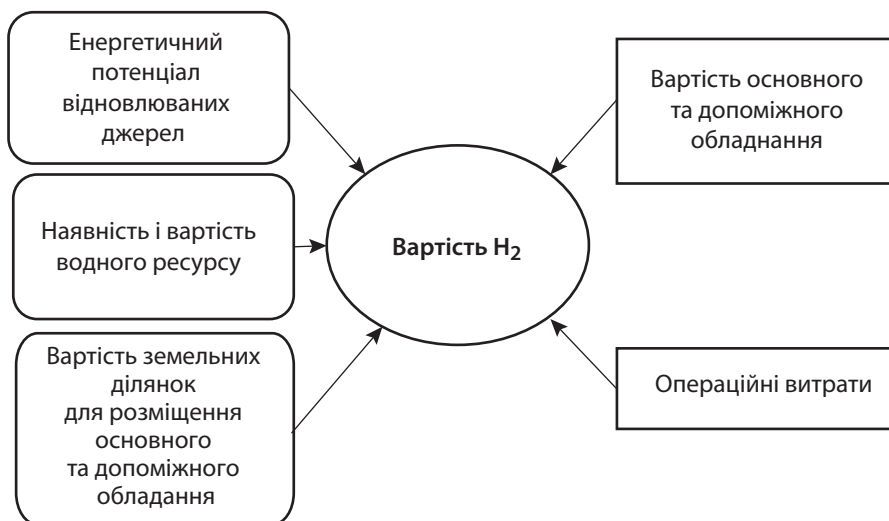


Рис. 2. Фактори, які впливають на вартість «зеленого» водню

Джерело: авторська розробка.

Таблиця 4

Прогнозні значення техніко-економічних показників виробництва «зеленого» водню

Виробництво водню електролізерами	Капітальні витрати (євро/кВт)	Операційні витрати/рік, %	Ефективність системи	Електроенергія (4,000–5,000 год) (євро/МВт·год)	Водень (євро/кг)
2020–2025 рр.	300–600	1,5%	75–80%	25–50	1,5–3,0
2025–2030 рр.	250–500	1%	80–82%	15–30	1,0–2,0
До 2050 р.	< 200	< 1%	> 82%	10–30	0,7–1,5

Джерело: складено на основі [30].

Європа та Північна Америка відіграють важливу роль у просуванні водневої економіки. Зростають інвестиції у водневу інфраструктуру у зв'язку зі швидкою популяризацією відновлюваних джерел енергії в Європі, щоб реалізувати свої амбітні цілі щодо скорочення викидів CO<sub>2</sub>. Китай та Індія також беруть участь у дослідженнях і розробках у сфері водневих технологій та планують впроваджувати водневі станції. Незважаючи на те, що Японія зберігає обмежений і стабільний масштаб ринку, що становить близько 100 млрд дол., вона має найвищий рівень популяризації водневої інфраструктури. За прогнозом, у 2050 р. Європа, Північна Америка та Китай стануть основними ринками водню, з охопленням близько 60% світового ринку. За ними, згідно з прогнозами, йтимуть Індія та Японія. Ці країни розробили спеціальну стратегію та політику для просування технологічних інновацій та розвитку ринку [32].

На наш погляд, детального розгляду заслуговують стратегії Японії, Німеччини та ЄС загалом.

Відповідно до Стратегічного енергетичного плану Японії, який був опублікований у 2014 р., передбачається, що впровадження водневої економіки в Японії забезпечить стабільне енергопостачання, підвищить економічну ефективність, адаптується до

поліпшення стану навколишнього середовища та підвищить рівень енергетичної безпеки.

Прогнозується, що воднева економіка сприятиме підвищенню енергетичної безпеки. В Японії транспортний сектор споживає близько 1/5 національного енергоспоживання, що забезпечується за рахунок нафти та нафтопродуктів. З популяризацією FCV нафтопродукти, імпортовані з інших нестабільних регіонів, будуть заміщені водневим паливом, що імпортується зі стабільних регіонів.

Популяризація когенерації водню надасть змогу підвищити рівень ефективності використання енергії, особливо виробництво водню з використанням CCS може забезпечити енергопостачання без CO<sub>2</sub>. Вважається, що воднева енергія знижує негативний вплив на навколишнє середовище.

Однією з характерних рис політики просування водневих технологій в Японії є широке системне співробітництво між урядом, промисловістю та дослідницькими секторами для розробки технологій та сприяння популяризації водневої економіки.

Розроблена технологічна карта Японії – просування водневої економіки. До 2030-х рр. Японія буде реалізовувати інноваційну водневу економіку без CO<sub>2</sub>, завдяки якій японське суспільство зможе досягти стійкого економічного зростання, викорис-

товуючи активний експорт і передачу технологій у сфері водневої енергетики [34]. Для досягнення цієї мети «воднева» економіка була відзначена в Стратегії активізації Японії [33]. Японія планує вивести на ринок до 2030 р. 5,3 млн побутових паливних елементів, а також популяризувати FCV і водневі станції з дерегуляцією відповідної політики з метою забезпечення чистого та економічного енергопостачання [31]. Водень визначається як важлива вторинна енергія поряд з електрикою та теплом, у зв'язку з чим уряд почав розробку дорожньої карти для огляду розвитку та впровадження технологій для виробництва водню. Дорожня карта направлена на реалізацію трьох етапів реалізації водневої економіки:

**1. (2015 р. –...): активна популяризація використання водню.** Використання стаціонарних паливних елементів і значне розширення FCV для того, щоб Японія посіла лідируюче місце на світовому ринку водневих і паливних елементів.

**2. (2025 р. –...): повністю впровадити виробництво водню, створити розширену інфраструктуру для постачання водню.** Зі збільшенням потреби у водні просувати використання водневих технологій у сфері енергії, щоб водень з електрикою і теплом став трьома основними формами вторинної енергії.

**3. (2040 р. –...): створення систем подачі водню без використання CO<sub>2</sub>.** Шляхом об'єднання CCS у виробництві водню та використанні відновлюваних джерел енергії, в цілому, створення системи подачі водню без CO<sub>2</sub>.

Дорожня карта була переглянута у 2016 р., план популяризації водневих технологій набув прискорення, а цільова ціна та кількість виробленої продукції були визначені [31].

**Н**імецька національна воднева стратегія передбачає досягнення мети нейтральності парникових газів і виконання міжнародних зобов'язань за рахунок переходу на «водневу» економіку. У ній передбачено створення можливості для встановлення водню як варіанта декарбонізації. З точки зору Федерального уряду, тільки водень, який був отриманий на основі відновлюваних джерел енергії («зелений» водень) є стійким у довгостроковій перспективі. Тому метою Федерального уряду є використання «зеленого» водню для підтримки швидкого зростання ринку. Передбачається, що глобальний та європейський ринки водню з'являться в найближчі десять років. На цьому ринку також буде продаватися CO<sub>2</sub> – нейтральний (наприклад, «синій» або «бірюзовий») водень.

У стратегії зазначено, що Федеральний уряд із самого початку усвідомлював можливості водневих технологій. Так, наприклад, у рамках Національної інноваційної програми «Водень і технологія паливних елементів» (2006–2016 рр.) було схвалено фінансування на суму близько 700 млн євро, а на період з 2016 по

2026 рр. обсяг фінансування складе до 1,4 млрд євро. Крім того, прикладні фундаментальні дослідження, пов'язані із «зеленим» воднем, які є частиною програми «Енергетичного та Кліматичного фонду» в період з 2020 по 2023 рр., будуть профінансовані на суму 310 млн євро, подальше розширення фінансування призначене для прикладних енергетичних досліджень і зміцнення водневих технологій на суму 200 млн євро з 2020 по 2023 рр. Також на «Реальній лабораторії енергетичного переходу» з 2020 по 2023 рр. заплановано 600 млн євро. У рамках Національної програми декарбонізації передбачено інвестиції в технології та великі промислові підприємства; сприяння тому, щоб використовувати водень для декарбонізації виробничих процесів, на що планується виділити з 2020 по 2023 рр. більше 1 млрд євро. Інші програми з просування використання водню у промисловому виробництві для запобігання викидів CO<sub>2</sub> в основні галузі промисловості стосуються підтримки промислових інвестицій у водневі технології. До того ж, пакет коаліційного комітету на майбутнє від 3 червня 2020 р. передбачає додаткові 7 млрд євро для запуску ринку водневих технологій у Німеччині та ще 2 млрд євро для міжнародного партнерства. Це засоби, фактично доступні для цього, – відповідні програми є результатом відповідних бюджетних статей.

У національній водневій стратегії Німеччини сформовано такі цілі:

- ✦ взяти на себе глобальну відповідальність;
- ✦ зробити водень конкурентоспроможним;
- ✦ розвинути «внутрішній ринок» для водневих технологій у Німеччині, підготувати способи для імпорту (Федеральний уряд вбачає потребу у водні приблизно від 90 до 110 ТВт·год до 2030 р. Щоб задовольнити цю потребу, до 2030 р. у Німеччині будуть встановлені електростанції потужністю до 5 ГВт. Загальна продуктивність, включаючи необхідне морське та берегове вироблення енергії, відповідає виробництву «зеленого» водню до 14 ТВт·год. При цьому потрібний обсяг відновлюваної електроенергії – до 20 ТВт·год за 4000 годин повного навантаження і середній ефективності електролізних установок 70%);
- ✦ встановити водень як альтернативне джерело енергії;
- ✦ зробити водень стійкою сировиною для промисловості;
- ✦ забезпечити подальший розвиток транспортної та розподільчої інфраструктур;
- ✦ просувати науку, готувати фахівців;
- ✦ розробити та супроводжувати процеси трансформації;
- ✦ зміцнити економіку Німеччини та забезпечити можливості для глобального ринку для німецьких компаній;



- ✦ встановити міжнародні ринки та партнерства для водню;
- ✦ розглядати глобальну співпрацю як можливість;
- ✦ забезпечити якісну інфраструктуру для виробництва, транспортування, зберігання і використання водню;
- ✦ постійно вдосконалювати базові умови та впроваджувати поточні розробки.

Також у стратегії значну увагу приділено таким напрямкам:

- ✦ статус-кво та очікуваний розвиток для водню та його похідних;
- ✦ генерація водню;
- ✦ промисловість;
- ✦ транспорт і військові технології;
- ✦ ринок опалення;
- ✦ водень як проєкт європейської спільноти;
- ✦ міжнародна торгівля;
- ✦ транспортна та розподільча інфраструктури всередині країни та за кордоном;
- ✦ дослідження, освіта та інновації.

У даній стратегії також детально розписано «покроковий план дій», що передбачає 38 пунктів, де передбачено створення керівного органу – «Національної Водневої Ради» [35].

Для обміну інформацією та сприяння переходу на «зелений» водень була запущена платформа «Воднева долина» – глобальна платформа для обміну інформацією, розроблена Спільним підприємством з паливних елементів і водневому з'єднанню для підтримки держав – членів Місії Innovation IC8.

Її мета – сприяти появі та реалізації провідних водневих проєктів («водневих долин») і підвищувати поінформованість серед політиків, тим самим сприяти переходу на екологічно чисту енергію [31]. Платформа буде надавати актуальну інформацію про існуючі проєкти водневої «долини», надаючи при цьому різні інструменти підтримки для розробки, реалізації проєктів і сприяння взаємодії.

**П**отрібно відзначити, що 08.07.2020 р. європейською спільнотою була прийнята нова воднева стратегія ЄС разом зі стратегією інтеграції енергосистеми [36]. У ній передбачено, що в інтегрованій енергетичній системі водень може сприяти декарбонізації промисловості, транспорту, виробництва електроенергії та будівель по всій Європі. У водневій стратегії ЄС передбачено перетворити потенціал у реальність за рахунок інвестицій, регулювання, створення ринку та наукових досліджень та інновацій.

Водень може бути джерелом енергії для секторів, які не підходять для електрифікації, та забезпечувати зберігання для балансування змінних потоків відновлюваної енергії, але цього можна досягти тільки за допомогою скоординованих дій між держав-

ним і приватним секторами на рівні ЄС. Пріоритетом є розробка поновлюваного водню, виробленого, в основному, з використанням енергії вітру та Сонця. Проте в коротко- та середньостроковій перспективі необхідні інші форми використання водню для швидкого скорочення викидів і підтримки розвитку ринку.

Такий перехід потребує поетапного підходу:

1. У період з 2020 р. по 2024 р. буде підтримуватися установка як мінімум 6 ГВт поновлюваних електролізерів водню в ЄС і виробництво до 1 млн т поновлюваного водню.
2. У період з 2025 р. по 2030 р. водень повинен стати невід'ємною частиною нашої інтегрованої енергетичної системи, в якій щонайменше 40 ГВт поновлюваних електролізерів водню та виробництво до 10 млн т поновлюваного водню в ЄС.
3. З 2030 р. по 2050 р. поновлювані водневі технології мають досягти зрілості та бути розгорнуті в широких масштабах у всіх вуглецевих секторах.

Для сприяння реалізації цієї Стратегії Комісія створює Європейський альянс чистого водню з лідерами галузі, громадянським суспільством, міністрами на національному та регіональному рівнях та Європейським інвестиційним банком. Альянс створить інвестиційний трубопровід для розширення виробництва та підтримає попит на чистий водень в ЄС [36].

Щоб зосередити підтримку на найчистіших з доступних технологій, Комісія буде працювати над впровадженням загальних стандартів, термінології та сертифікації, заснованих на викидах вуглецю протягом життєвого циклу, закріплених в існуючому кліматичному та енергетичному законодавстві і, відповідно, до таксономії ЄС для стійких інвестицій. Комісія запропонує політичні та нормативні заходи для забезпечення впевненості інвесторів, сприяння поглинанню водню, розвитку необхідної інфраструктури та логістичних мереж, адаптації інструментів планування інфраструктури та підтримки інвестицій.

## ВИСНОВКИ

Дослідження світових тенденцій, доповідей провідних організацій, законодавчої бази розвинених країн надає змогу стверджувати про те, що використання водню є перспективним низьковуглецевим енергетичним рішенням на стратегічну перспективу. Вже розроблені основні елементи системи забезпечення воднем споживачів як промисловості, так і опосередковано домашніх господарств. Виявлено, що виробництво водню доцільно з тісним поєднанням цієї технології з іншими технологіями відновлюваної та класичної енергетики. Основні споживачі водневої енергетики на сьогодні зосереджені в енергетичній і транспортній сферах. Для екології важливо врахувати те, з якого саме водню – «сірого» чи «зеленого» – буде використовуватися енергія, адже сталий

розвиток передбачає використання більшою мірою низьковуглецевої енергетики. Техніко-економічні показники технологій виробництва водню показують доцільність розвитку цих технологій у промислових масштабах на засадах розподіленого та централізованого виробничих шляхів.

Основними гравцями на ринку водню можуть бути Європа та Північна Америка, Японія, Китай, Індія. Воднева економіка для цих країн і регіонів може сприяти підвищенню рівня енергетичної безпеки. В Японії, Німеччині та інших країнах вже прийнято програми розвитку водневої економіки на державному рівні.

Дослідження доступних інформаційних джерел надало можливість стверджувати про те, що Україна також може брати активну участь у розробці та використанні перспективних водневих технологій. ■

#### ЛІТЕРАТУРА

- Eichman J., Townsend A., Melaina M. Economic Assessment of Hydrogen Technologies Participating in California Electricity Markets. URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy16osti/65856.pdf>
- Kharel S., Shabani B. Hydrogen as a Long-Term Large-Scale Energy Storage Solution to Support Renewables. *Energies*. 2018. Vol. 11. No. 10. DOI: <https://doi.org/10.3390/en11102825>
- Shabani B., Andrews J. Hydrogen and fuel cells // *Energy Sustainability through Green Energy*. New Delhi : Springer, 2015. P. 453–491.
- Glenk G., Reichelstein S. Economics of converting renewable power to hydrogen. *Nature Energy*. 2019. Vol. 4. No. 3. P. 216–222. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41560-019-0326-1>
- Brandon N. P., Kurban Z. Clean energy and the hydrogen economy. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2017. Vol. 375. Issue 2098. DOI: <https://doi.org/10.1098/rsta.2016.0400>
- Кулик О. П., Чернышев Л. И. Основные направления развития водородной энергетики (Обзор) : препринт. Киев, 2013. 40 с. URL: [http://www.materials.kiev.ua/hydrogen\\_2011-2015/obzor1.pdf](http://www.materials.kiev.ua/hydrogen_2011-2015/obzor1.pdf)
- Цыганков А. А. Получение водорода биологическим путем. *Российский химический журнал*. 2006. Т. 50. № 6. С. 26–33.
- Young J. L., Döscher H., Turner J. A., Deutsch T. G. Reversible GaInP<sub>2</sub> Surface Passivation by Water Adsorption: A Model System for Ambient-Dependent Photoluminescence. *The Journal of Physical Chemistry C*. 2016. Vol. 120. Issue 8. P. 4418–4422. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.5b12498>
- Döscher H. et al. Solar-to-hydrogen efficiency: shining light on photoelectrochemical device performance. *Energy & Environmental Science*. 2016. Vol. 9. Issue 1. P. 74–80. DOI: [10.1039/C5EE03206G](https://doi.org/10.1039/C5EE03206G)
- Кудря С. О., Морозов Ю. П., Кузнецов М. П. Дослідження і оптимізація систем отримання водню шляхом застосування електролізу води з використанням енергії вітру, сонячної радіації та геотермальної енергії // *Фундаментальні аспекти відновлювано-водневої енергетики і паливно-комірчанних технологій* : монографія / заг. ред. Ю. М. Солоніна. Київ : КІМ, 2018. С. 3–14.
- Кудря С. О., Морозов Ю. П., Кузнецов М. П. Отрицания водню з застосуванням вітроелектричних установок // *Водень в альтернативній енергетиці та новітніх технологіях* : монографія / заг. ред. В. В. Скорохода, Ю. М. Солоніна. Київ : КІМ, 2015. С. 98–105.
- Chi J., Yu H. Water electrolysis based on renewable energy for hydrogen production. *Chinese Journal of Catalysis*. 2018. Vol. 39. Issue 3. P. 390–394. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1872-2067\(17\)62949-8](https://doi.org/10.1016/S1872-2067(17)62949-8)
- Sapountzi F. M. et al. Electrocatalysts for the generation of hydrogen, oxygen and synthesis gas. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2017. Vol. 58. P. 1–35. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2016.09.001>
- Møller K. T., Torben R. Jensen T. R., Akiba E., Li H.-W. Hydrogen-A sustainable energy carrier. *Progress in Natural Science: Materials International*. 2017. Vol. 27. Issue 1. P. 34–40. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2016.12.014>
- Glenk G., Reichelstein S. Synergistic Value in Vertically Integrated Power-to-Gas Energy Systems. *Production and Operations Management*. 2020. Vol. 29. Issue 3. P. 526–546. DOI: <https://doi.org/10.1111/poms.13116>
- Ball M., Weeda M. The hydrogen economy – vision or reality? *International Journal of Hydrogen Energy*. 2015. Vol. 40. Issue 25. P. 7903–7919. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.04.032>
- Dou Y. et al. Opportunities and future challenges in hydrogen economy for sustainable development // *Hydrogen Economy*. Chapter 10. Academic Press, 2017. P. 277–305. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811132-1.00010-9>
- Kothari R., Buddhi D., Sawhney R. L. Comparison of environmental and economic aspects of various hydrogen production methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2008. Vol. 12. Issue 2. P. 553–563. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.07.012>
- Afgan N. H., Carvalho M. G. Sustainability assessment of hydrogen energy systems. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2004. Vol. 29. Issue 13. P. 1327–1342. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2004.01.005>
- Bossel U. Does a Hydrogen Economy Make Sense? *Proceedings of the IEEE*. 2006. Vol. 94. Issue 10. P. 1826–1837. DOI: [10.1109/JPROC.2006.883715](https://doi.org/10.1109/JPROC.2006.883715)
- Dagdougui H., Sacile R., Bersani Ch., Ouammi A. Hydrogen Infrastructure for Energy Applications: Production, Storage, Distribution and Safety. Academic Press, 2018. 166 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2016-0-03214-X>
- Nikolaidis P., Poullikkas A. A comparative overview of hydrogen production processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 67. P. 597–611. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.044>
- Kayfeci M., Keçebaş A., Bayat M. Hydrogen production // *Solar Hydrogen Production*. Academic Press, 2019. P. 45–83.

24. Levin D. B., Chahine R. Challenges for renewable hydrogen production from biomass. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2010. Vol. 35. Issue 10. P. 4962–4969. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.08.067>
25. Ehret O., Bonhoff K. Hydrogen as a fuel and energy storage: Success factors for the German Energiewende. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2015. Vol. 40. Issue 15. P. 5526–5533. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.01.176>
26. Sapountzi F. M. et al. Electrocatalysts for the generation of hydrogen, oxygen and synthesis gas. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2017. Vol. 58. P. 1–35. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2016.09.001>
27. Matute G., Yusta J. M., Correas L. C. Techno-economic modelling of water electrolyzers in the range of several MW to provide grid services while generating hydrogen for different applications: A case study in Spain applied to mobility with FCEVs. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019. Vol. 44. Issue 33. P. 17431–17442. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.05.092>
28. Zeng K., Zhang D. Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2010. Vol. 36. Issue 3. P. 307–326. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2009.11.002>
29. Hydrogen Roadmap Europe: A Sustainable Pathway for the European Energy Transition. 2019. 70 p. URL: [https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/Hydrogen%20Roadmap%20Europe\\_Report.pdf](https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/Hydrogen%20Roadmap%20Europe_Report.pdf)
30. Path to Hydrogen Competitiveness: A Cost Perspective / Hydrogen Council: Brussels, Belgium. 2020. 79 p. URL: [https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2020/01/Path-to-Hydrogen-Competitiveness\\_Full-Study-1.pdf](https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2020/01/Path-to-Hydrogen-Competitiveness_Full-Study-1.pdf)
31. Launch of the Hydrogen Valley Platform – 2020. URL: <https://www.fch.europa.eu/news/launch-hydrogen-valley-platform>
32. Hydrogen from Renewable Power. Technology Outlook for the Energy Transition. September 2018. 52 p. URL: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Sep/IRENA\\_Hydrogen\\_from\\_renewable\\_power\\_2018.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Sep/IRENA_Hydrogen_from_renewable_power_2018.pdf)
33. Harada M., Ichikawa T., Takagi H., Uchida H. Building a hydrogen infrastructure in Japan // Compendium of Hydrogen Energy. Vol. 4 : Hydrogen Use, Safety and the Hydrogen Economy. Woodhead Publishing Series in Energy, 2016. P. 321–335. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-364-5.00014-2>
34. Nagashima M. Japan's Hydrogen Strategy and its Economic and Geopolitical Implications. IFRI, 2018. 75 p. URL: [https://www.ifri.org/sites/default/files/atoms/files/nagashima\\_japan\\_hydrogen\\_2018\\_.pdf](https://www.ifri.org/sites/default/files/atoms/files/nagashima_japan_hydrogen_2018_.pdf)
35. BMWi – Die Nationale Wasserstoffstrategie. Retrieved, 2020. URL: <https://www.bmw.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationalewasserstoffstrategie.html>
36. Powering a climate-neutral economy: Commission sets out plans for the energy system of the future and clean hydrogen / European Commission. 8 July 2020. [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip\\_20\\_1259?fbclid=IwAR3HrnWmhaO0BDEXbTBJDFVbnQBqM9evhn8Cd6mr4WnBZir-Luf3ccbl6bg](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_20_1259?fbclid=IwAR3HrnWmhaO0BDEXbTBJDFVbnQBqM9evhn8Cd6mr4WnBZir-Luf3ccbl6bg)

## REFERENCES

- Afgan, N. H., and Carvalho, M. G. "Sustainability assessment of hydrogen energy systems". *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 29, no. 13 (2004): 1327-1342. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2004.01.005>
- "BMWi – Die Nationale Wasserstoffstrategie". Retrieved, 2020. <https://www.bmw.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationalewasserstoffstrategie.html>
- Ball, M., and Weeda, M. "The hydrogen economy – vision or reality?" *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 40, no. 25 (2015): 7903-7919. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.04.032>
- Bossel, U. "Does a Hydrogen Economy Make Sense?" *Proceedings of the IEEE*, vol. 94, no. 10 (2006): 1826-1837. DOI: 10.1109/JPROC.2006.883715
- Brandon, N. P., and Kurban, Z. "Clean energy and the hydrogen economy". *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 375, no. 2098 (2017). DOI: <https://doi.org/10.1098/rsta.2016.0400>
- Chi, J., and Yu, H. "Water electrolysis based on renewable energy for hydrogen production". *Chinese Journal of Catalysis*, vol. 39, no. 3 (2018): 390-394. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1872-2067\(17\)62949-8](https://doi.org/10.1016/S1872-2067(17)62949-8)
- Dagdougui, H. et al. *Hydrogen Infrastructure for Energy Applications: Production, Storage, Distribution and Safety*. Academic Press, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2016-0-03214-X>
- Doscher, H. et al. "Solar-to-hydrogen efficiency: shining light on photoelectrochemical device performance". *Energy & Environmental Science*, vol. 9, no. 1 (2016): 74-80. DOI: 10.1039/C5EE03206G
- Dou, Y. et al. "Opportunities and future challenges in hydrogen economy for sustainable development". In *Hydrogen Economy. Chapter 10*, 277-305. Academic Press, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811132-1.00010-9>
- Ehret, O., and Bonhoff, K. "Hydrogen as a fuel and energy storage: Success factors for the German Energiewende". *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 40, no. 15 (2015): 5526-5533. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.01.176>
- Eichman, J., Townsend, A., and Melaina, M. "Economic Assessment of Hydrogen Technologies Participating in California Electricity Markets". <https://www.nrel.gov/docs/fy16osti/65856.pdf>
- Glenk, G., and Reichelstein, S. "Economics of converting renewable power to hydrogen". *Nature Energy*, vol. 4, no. 3 (2019): 216-222. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41560-019-0326-1>
- Glenk, G., and Reichelstein, S. "Synergistic Value in Vertically Integrated Power-to-Gas Energy Systems". *Production and Operations Management*, vol. 29, no. 3 (2020): 526-546. DOI: <https://doi.org/10.1111/poms.13116>
- "Hydrogen from Renewable Power. Technology Outlook for the Energy Transition. September 2018". [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Sep/IRENA\\_Hydrogen\\_from\\_renewable\\_power\\_2018.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Sep/IRENA_Hydrogen_from_renewable_power_2018.pdf)

- "Hydrogen Roadmap Europe: A Sustainable Pathway for the European Energy Transition". 2019. [https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/Hydrogen%20Roadmap%20Europe\\_Report.pdf](https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/Hydrogen%20Roadmap%20Europe_Report.pdf)
- Harada, M. "Building a hydrogen infrastructure in Japan". *Compendium of Hydrogen Energy*, vol. 4 : Hydrogen Use, Safety and the Hydrogen Economy. *Woodhead Publishing Series in Energy* (2016): 321-335. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-364-5.00014-2>
- Kayfeci, M., Kecebas, A., and Bayat, M. "Hydrogen production". In *Solar Hydrogen Production*, 45-83. Academic Press, 2019.
- Kharel, S., and Shabani, B. "Hydrogen as a Long-Term Large-Scale Energy Storage Solution to Support Renewables". *Energies*, vol. 11, no. 10 (2018). DOI: <https://doi.org/10.3390/en11102825>
- Kothari, R., Buddhi, D., and Sawhney, R. L. "Comparison of environmental and economic aspects of various hydrogen production methods". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, no. 2 (2008): 553-563. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.07.012>
- Kudria, S. O., Morozov, Yu. P., and Kuznietsov, M. P. "Doslidzhennia i optymizatsiia system otrymannia vodniu shliakhom zastosuvannia elektrolizu vody z vykorystanniam enerhii vitru, soniachnoi radiatsii ta heotermalnoi enerhii" [Research and Optimization of Hydrogen Production Systems by Applying Water Electrolysis Using Wind Energy, Solar Radiation and Geothermal Energy]. In *Fundamentalni aspekty vidnovliuvano-vodnevoi enerhetyky i palyvno-komirchanykh tekhnolohii*, 3-14. Kyiv: KIM, 2018.
- Kudria, S. O., Morozov, Yu. P., and Kuznietsov, M. P. "Otrymannia vodniu z zastosuvanniam vitroelektrychnykh ustanovok" [Obtaining Hydrogen Using Wind Turbines]. In *Voden v alternatyvnyi enerhetytsi ta novitnikh tekhnolohiiakh*, 98-105. Kyiv: KIM, 2015.
- Kulik, O. P., and Chernyshev, L. I. "Osnovnyye napravleniya razvitiya vodorodnoy energetiki (Obzor)" [The Main Directions of Development of Hydrogen Energy (Review)]. Kyiv, 2013. [http://www.materials.kiev.ua/hydrogen\\_2011-2015/obzor1.pdf](http://www.materials.kiev.ua/hydrogen_2011-2015/obzor1.pdf)
- "Launch of the Hydrogen Valley Platform – 2020". <https://www.fch.europa.eu/news/launch-hydrogen-valley-platform>
- Levin, D. B., and Chahine, R. "Challenges for renewable hydrogen production from biomass". *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 35, no. 10 (2010): 4962-4969. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.08.067>
- Matute, G., Yusta, J. M., and Correias, L. C. "Techno-economic modelling of water electrolyzers in the range of several MW to provide grid services while generating hydrogen for different applications: A case study in Spain applied to mobility with FCEVs". *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 33 (2019): 17431-17442. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.05.092>
- Moller, K. T. et al. "Hydrogen-A sustainable energy carrier". *Progress in Natural Science: Materials International*, vol. 27, no. 1 (2017): 34-40. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2016.12.014>
- Nagashima, M. "Japan's Hydrogen Strategy and its Economic and Geopolitical Implications". IFRI, 2018. [https://www.ifri.org/sites/default/files/atoms/files/nagashima\\_japan\\_hydrogen\\_2018\\_.pdf](https://www.ifri.org/sites/default/files/atoms/files/nagashima_japan_hydrogen_2018_.pdf)
- Nikolaïdis, P., and Poullikkas, A. "A comparative overview of hydrogen production processes". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 67 (2017): 597-611. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.044>
- "Path to Hydrogen Competitiveness: A Cost Perspective". Hydrogen Council: Brussels, Belgium. 2020. [https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2020/01/Path-to-Hydrogen-Competitiveness\\_Full-Study-1.pdf](https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2020/01/Path-to-Hydrogen-Competitiveness_Full-Study-1.pdf)
- "Powering a climate-neutral economy: Commission sets out plans for the energy system of the future and clean hydrogen". European Commission. 8 July 2020. [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip\\_20\\_1259?fbclid=IwAR3HrnWmhaO0BDEXbTBJDFVbnQBqM9evhn8Cd6mr4WnBZir-LUF3ccbl6bg](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_20_1259?fbclid=IwAR3HrnWmhaO0BDEXbTBJDFVbnQBqM9evhn8Cd6mr4WnBZir-LUF3ccbl6bg)
- Sapountzi, F. M. et al. "Electrocatalysts for the generation of hydrogen, oxygen and synthesis gas". *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 58 (2017): 1-35. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2016.09.001>
- Sapountzi, F. M. et al. "Electrocatalysts for the generation of hydrogen, oxygen and synthesis gas". *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 58 (2017): 1-35. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2016.09.001>
- Shabani, B., and Andrews, J. "Hydrogen and fuel cells". In *Energy Sustainability through Green Energy*, 453-491. New Delhi: Springer, 2015.
- Tsygankov, A. A. "Poluchenie vodoroda biologicheskim putem" [Obtaining Hydrogen by Biological Means]. *Rossiyskiy khimicheskii zhurnal*, vol. 50, no. 6 (2006): 26-33.
- Young, J. L. et al. "Reversible GaInP2 Surface Passivation by Water Adsorption: A Model System for Ambient-Dependent Photoluminescence". *The Journal of Physical Chemistry C*, vol. 120, no. 8 (2016): 4418-4422. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.5b12498>
- Zeng, K., and Zhang, D. "Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications". *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 36, no. 3 (2010): 307-326. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2009.11.002>