

УДК 621.311
DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.5/30>

Шрайбер О.А.

Інститут загальної енергетики Національної академії наук України

Дубровський В.В.

Інститут загальної енергетики Національної академії наук України

Тесленко О.І.

Інститут загальної енергетики Національної академії наук України

СУЧАСНИЙ СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ВОДНЕВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ У СВІТІ

У статті представлено результати аналітичного огляду сучасного стану і перспектив розвитку водневої енергетики в європейських країнах та інших країнах світу.

Нині використання водню як потенційної альтернативи викопному вуглецевому паливу претендує на статус одного з основних каталізаторів енергетичної трансформації у напрямку сталого розвитку суспільства із всеохоплюючим застосуванням відновлювальних джерел енергії (ВДЕ).

Водень розглядають передусім як енергоносіє, здатний переносити надлишок енергії, виробленої із ВДЕ, у ті періоди доби або сезону, коли в енергосистемі виникає дефіцит енергії. «Зелений» водень, вироблений із використанням вітрової або сонячної електроенергії методом електролізу води, у майбутньому посідатиме важливе місце у світовій економіці та може використовуватися для заміни природного газу як у сфері енергетики, так і у промисловості або транспорті.

Однак для виробництва надзвичайно багатого енергією водню методом електролізу води потрібна величезна кількість електроенергії, що зумовлює нині його більшу вартість, ніж традиційного викопного палива. За даними Європейської комісії за 2020 рік, «сірий» водень на основі викопного палива коштує близько 1,50 євро/кг; орієнтовна вартість «синього» водню, отриманого із природного газу з уловлюванням вуглецю, становить 2 євро/кг, тоді як «зелений» водень коштує від 2,50 євро/кг до 5,50 євро/кг.

Слід зазначити, що відносно прогнозів використання водню світ нині знаходиться у такій ситуації, в якій перебував раніше під час поширення ВДЕ у 2000–2005 роках. Наступні десять-п'ятнадцять років, імовірно, є достатнім проміжком часу для встановлення статусу водню як більш конкурентоспроможного. За прогнозами, до 2050 року у більшості регіонів світу «зелений» водень разом із суттєвим зменшенням витрат на отримання електроенергії із ВДЕ може вироблятися за ціною від 0,8 до 1,6 дол. США/кг. Транспортування водню трубопроводами із Північної Африки до Німеччини може здійснюватися за ціною 0,5 дол. США/кг.

В енергетиці перспективним напрямом застосування водню як палива є газові турбіни, здатні працювати на чистому водні як за постійного навантаження, так і за маневрених і пікових режимів експлуатації, що потрібно для балансування енергетичних систем із значною часткою ВДЕ.

Газоподібний водень (при тиску 350 бар) може застосовуватися для важковантажних транспортних засобів, таких як вантажівки, поїзди або будівельна техніка.

Основною технологією виробництва сталі із залізорудної сировини буде технологія прямого відновлення заліза із використанням водню. До 2050 року частка використання різних видів палива у металургії докорінно зміниться: споживання вугілля скоротиться на 40%, а споживання електроенергії подвоїться; 30% цієї електроенергії (або близько 700 ТВт · год) використовуватиметься для виробництва електролізного водню, що потребуватиме близько 165 ГВт електричної потужності електролізерів.

Норвезька компанія Nel Hydrogen розпочала будівництво найбільшого у світі повністю автоматизованого заводу із виробництва електролізерів загальною потужністю 360 МВт на рік, який постачатиме дешеві, але водночас найефективніші електролізери.

Перспективним напрямом великомасштабного сезонного підземного зберігання водню (underground hydrogen storage, UHS) є його накопичення у геологічних формаціях.

За прогнозами, у 2050 році водень забезпечуватиме 24% світових потреб в енергії, а глобальні викиди від викопного палива зменшаться на третину; до 2030 року річний попит на «зелений» водень зростатиме до 8,7 млн. т.

У Європейській водневій стратегії викладено трьохетапний план, який починається із будівництва електролізерів для виробництва «зеленого» водню для подальшого використання у промисловості (сталеливарної, хімічної, нафтопереробної) до 2024 року, надалі створюватимуться локальні виробництва водню (до 2030 р.), які будуть пов'язані між собою задля формування великої європейської водневої інфраструктури. У період 2030 – 2050 рр. чисті водневі технології будуть широко використовуватися у важкій промисловості. Європейський союз (ЄС) планує до 2024 р. мати 6 ГВт електролізерів для «зеленого» водню, які вироблятимуть до 1 млн. тонн «зеленого» водню, а до 2030 р. – 40 ГВт електролізерів, які вироблятимуть 10 млн. тонн водню, а також до 120 ГВт вітрових та сонячних електростанцій для них. Очікується, що в ЄС до 2030 р. будуть інвестовані 40 млрд. євро у виробничі потужності для «зеленого» водню. До 2050 р. сукупні інвестиції у «зелений» водень в Європі можуть становити до 180-470 млрд. євро.

Представлено аналіз особливостей водневих стратегій Європейських країн та інших країн світу.

Ключові слова: водень, відновлювані джерела енергії, сучасний стан, перспективи розвитку.

Нині використання водню як потенційної альтернативи викопному вуглецевому паливу стає актуальною темою дискусій у галузі енергетики і претендує на статус одного з основних каталізаторів енергетичної трансформації у напрямку сталого розвитку суспільства із всеохоплюючим застосуванням відновлювальних джерел енергії (ВДЕ). В якості стимулюючих чинників такої енергетичної трансформації все частіше розглядаються дві основні технології – накопичувачі енергії і водень, які можуть забезпечити потрібне зберігання енергії, виробленої від ВДЕ стохастичного характеру – сонця і вітру. Для різних сфер застосування ці дві технології можуть успішно доповнювати одна одну. Якщо водень виявиться більш дешевим варіантом порівняно з іншими рішеннями у таких областях, як накопичення і зберігання енергії, високотемпературні промислові процеси, важковаговий автомобільний транспорт, морські перевезення та авіація, то він стане першорядним. Водень отримує новий політичний пріоритет на міжнародному рівні: більше 30 країн усього світу розробили свої власні водневі стратегії.

Перспектива рентабельного, так званого «зеленого» водню із нульовим рівнем викидів зумовлена широким упровадженням ВДЕ. Найбільші економіки світу готують «зелені» інвестиції для прискорення їх зростання. Міжнародне енергетичне агентство (МЕА) заявило, що технологія «зеленого» водню «готова до великого часу» і закликала уряди країн спрямувати інвестиції у водневу економіку.

Метою роботи є аналітичний огляд сучасного стану і перспектив розвитку водневої енергетики в Європейському Союзі та в інших країнах світу.

У роботі «Водень із відновлюваної електрики. Технологічний прогноз для енергетичної трансформації» Міжнародного агентства відновлюваної енергії (IRENA) наголошено, що водень, вироблений із використанням вітрової або сонячної елек-

троенергії методом електролізу води, у майбутньому посяде важливе місце у світовій економіці. Використання водню для зберігання надлишкової (у періоди низького попиту і високого вироблення) електроенергії, отриманої з ВДЕ, буде необхідним елементом енергосистеми з великою часткою ВДЕ, що забезпечуватиме її маневреність [1]. Прогноз Bloomberg New Energy Finance (BNEF) щодо водневої економіки також показує, що водень, вироблений із ВДЕ, може використовуватися для заміни природного газу як у сфері електроенергетики, так і у промисловості [2].

Водень як енергоносіє є незамінним для досягнення нульового рівня викидів парникових газів, насамперед двоокису вуглецю (CO_2). Мета країн Європейського Союзу (ЄС) щодо досягнення «кліматичної нейтральності» до 2050 р. передбачає скорочення викидів CO_2 в ЄС на 95% від рівня 1990 р. Попит на природний газ в ЄС знизиться з ~ 5000 ТВт·год у 2020 р. до ~ 4000 ТВт·год у 2050 р. До 2030-х років споживання природного газу буде незначно зростати внаслідок запланованого припинення електрогенерації із вугілля. У той час споживання природного газу без уловлювання вуглецю знизиться до нуля. Газ, що залишиться у системі, до 2050 р. повинен бути відновлюваним або очищеним від вуглецю (декарбонізованим до або після того, як він досягне ЄС). У 2050 р. від 300 до 800 ТВт·год електроенергії, виробленої в ЄС із використанням ВДЕ, спрямовуватиметься на роботу електролізерів для її трансформації у водень (power-to-gas). За даними МЕА, додавання усього 20% водню в європейську газову мережу призведе до щорічного скорочення викидів CO_2 на 60 млн. т [1].

Тільки ВДЕ здатні забезпечити стійку водневу економіку. Великомасштабне виробництво водню збільшує попит на електроенергію від ВДЕ. Для досягнення мети ЄС щодо скорочення викидів CO_2 до 2030 р. до мінус 55% порівняно

з 1990 р. потрібно розширити масштаби упровадження водневих технологій і прискорити темпи зростання використання ВДЕ.

Паливна цінність водню (142 кДж/г) є втричі вищою, ніж у традиційного палива, водночас він не чинить шкідливого впливу на навколишнє середовище. Близько 33,33 кВт·год енергії виробляється з 1 кг водневого палива, але тільки 12 кВт·год/кг і 14,7 кВт·год/кг – із бензину і стисненого природного газу відповідно. Автомобілі на паливних елементах проїжджають від 100 до 131 км, використовуючи 1 кг водню, тоді як традиційні автомобілі – 16 км, використовуючи 1 кг бензину [1]. Але для виробництва надзвичайно багатого енергією водню методом електролізу води потрібна величезна кількість електроенергії, що зумовлює нині його більшу вартість, ніж традиційного викопного палива.

Слід зазначити, що відносно прогнозів використання водню світ нині знаходиться в аналогічній ситуації, у якій перебував під час поширення ВДЕ у 2000-2005 рр. Наступні десять-п'ятнадцять років, імовірно, є достатнім проміжком часу для отримання воднем статусу більш конкурентоспроможного.

Сфери використання водню. Нині високий попит на водень існує на підприємствах металургійної, аміачної, хімічної і нафтопереробної промисловості, які потребують створення інноваційної водневої інфраструктури. Окрім того, прогнозується значний потенціал використання водню на транспорті у 2030-х і 2040-х рр., особливо на важковантажних комерційних транспортних засобах, а також в якості заміника природного газу [3].

Енергетика. Питання застосування водню як палива для електрогенерації вирішує низка компаній. Усі великі виробники енергетичних газових турбін – Mitsubishi Hitachi Power Systems, GE Power, Siemens Energy і Ansaldo Energia – розробляють моделі, здатні працювати на чистому водні як за постійного навантаження, так і за маневрених і пікових режимів експлуатації. Концерн Siemens Energy готує модифікацію промислової газової турбіни SGT-400, адаптовану для спалювання чистого водню, яка встановлюватиметься на ТЕЦ у Франції і Німеччині. У 2020 р. в Японії на водневому паливі запрацювала газотурбінна електростанція «Мідзуе» (компанії Taо Oil) зі встановленою потужністю 80 МВт. Японська Асоціація технологічного розвитку водневої енергетики (АНЕАД) планує до 2030 р. після відпрацювання технології на пілотних системах щорічно постав-

ляти в Японію 350 тис. т водню як палива для гігаватної електростанції. Компанія Mitsubishi Hitachi Power Systems отримала замовлення на водневосумісні турбіни для трьох газових проєктів у США загальною потужністю 3300 МВт. Спочатку (після 2022 і 2023 років) газові турбіни будуть здатні працювати на суміші 30% водню і 70% природного газу. Проєкт потужністю 840 МВт із переобладнання вугільної електростанції використовуватиме турбіни Mitsubishi Hitachi Power Systems, призначені для поступового переходу на використання 100% екологічно чистого водню. У проєктах буде використовуватиметься надлишок електроенергії із ВДЕ для виробництва водню [1, 4].

Транспорт. В автомобільному транспорті прогнозують заміну парку автобусів на дизельному паливі на автобуси, які працюють на водні. Газоподібний водень (при тиску 350 бар) може застосовуватися для важковантажних транспортних засобів, таких як вантажівки, поїзди або будівельна техніка. Автовиробники Daimler та Volvo оприлюднили плани щодо виведення протягом наступного десятиліття на ринок важковантажних транспортних засобів, які працюють на водні. На відміну від електроавтомобілів більш екологічні автомобілі із водневими паливними елементами, в яких щільність енергії є на порядок більшою порівняно з акумуляторними батареями, можуть заправлятися паливом протягом декількох хвилин.

У залізничному транспорті у 2019 р. був представлений прототип першого британського водневого поїзда HydroFlex, в одному з вагонів якого встановлений 100-кіловатний паливний елемент, літій-іонні батареї та ємність стисненого водню на 20 кг. Велика Британія (як і деякі інші країни) має намір із часом відмовитися від використання дизельних поїздів: остаточна заміна майже чотирьох тисяч дизельних поїздів запланована до 2040 р. Залізничні оператори низки країн за останні роки почали розглядати водневі потяги в якості екологічної альтернативи дизелю (електрифікація залізничних колій є високовартісним заходом). Французька компанія Alstom представила свій водневий потяг у 2016 році, а два роки потому ці водневі потяги стали курсувати за одним із маршрутів у Німеччині.

В авіації літаки з модифікованими газотурбінними двигунами на рідкому водневому паливі із нульовим викидом вуглекислого газу можуть бути введені в експлуатацію у 2035 р. [1].

Металургія. За оцінкою МЕА, яке розробило дорожню карту технологічних змін у металургійній промисловості світу, до 2070 р. основною

технологією виробництва сталі із залізорудної сировини буде технологія прямого відновлення заліза із використанням водню (до 41% загального виробництва сталі). Для низьковуглецевого отримання 1 т губчатого заліза за технологією його прямого відновлення із залізної руди потрібно витратити $\sim 1000 \text{ м}^3$ водню. До 2050 р. частка використання різних видів палива у металургії докорінно зміниться: споживання вугілля скоротиться на 40%, а споживання електроенергії подвоїться; 30% цієї електроенергії (або близько $700 \text{ ТВт} \cdot \text{год}$) використовуватиметься для виробництва електролізного водню, що потребуватиме близько 165 ГВт електричної потужності електролізерів [5, с. 53].

У Китаї компанією HBIS уже будується завод із упровадженням технології прямого відновлення заліза воднем. На першому етапі наприкінці 2021 р. із використанням водню, вловленого із коксового газу від коксових печей, вироблятиметься 0,6 млн. т сталі на рік. На другому етапі розвитку заводу щорічно вироблятиметься 0,6 млн. т заліза із застосуванням водню, отриманого за електролізною технологією із використанням електроенергії тільки від ВДЕ. На третьому етапі п'ятирічного плану розвитку компанія HBIS передбачає зростання обсягів щорічного виробництва до 3,6 млн. т заліза із застосуванням водню, отриманого за використання 100 % електроенергії від ВДЕ [6].

Виробництво водню. Нині 99,6% водню виробляють із вичерпаного палива з уловлюванням вуглецю («синій» водень) або без уловлювання («сірий» водень) шляхом парової конверсії метану або газифікації вугілля, причому використання таких методів спричинює утворення великих обсягів CO_2 . Отримання «зеленого» водню з води із використанням електролізної технології, яка споживає електроенергію із ВДЕ, є енергоємним, але безвуглецевим процесом, здатним замінити вичерпане паливо відповідно до плану ЄС щодо скорочення викидів парникових газів до нуля до 2050 р. Виробництво «синього» та «сірого» водню нині є дешевшим, ніж електролізного «зеленого», однак зростаючий попит і технічний розвиток може знизити собівартість виробництва «зеленого» водню. Двома найважливішими факторами витрат на екологічно чистий водень є ціна електроенергії із ВДЕ, яка продовжує знижуватись, і коефіцієнт використання електролізерів, який підвищується зі збільшенням попиту на екологічно чистий водень.

Зниженню собівартості виробництва водню за допомогою електролізерів сприяють успіхи у

пошуках альтернатив платиновому каталізатору, який нині є найефективнішим, проте його не можна використовувати для електролізу морської води. Розроблено недорогі каталізатори з міді із домішками нікелю і хрому, які можуть генерувати водневе паливо з води так само ефективно, як і платина, та використовувати морську воду без додаткового оброблення (опріснення) [1].

Електролізери. За оцінками компанії Wood Mackenzie, в ЄС є близько 135 МВт потужності електролізерів, але заплановані проекти можуть довести цю потужність до $5,2 \text{ ГВт}$. У 2019 р. у світі експлуатувалося більше 500 активних електролізерів. Найбільший у світі електролізер, який працює нині, – це багатомодульна установка загальною потужністю 10 МВт , яка живиться електроенергією від сонячної електростанції потужністю 20 МВт і розташована неподалік від міста Фукусіма в Японії [1, 7].

Європа та Австралія домінують у проектах електролізерів потужністю 1 ГВт і більше. У Китаї будується завод, який міститиме сонячну і берегову вітряні електростанції, енергія яких забезпечуватиме річне виробництво від 400 до 500 тис. т водню на рік [8]. Норвезька компанія Nel Hydrogen розпочала будівництво найбільшого у світі повністю автоматизованого заводу з виробництва електролізерів, який постачатиме дешеві, але водночас найефективніші електролізери; їхній випуск становитиме 360 МВт на рік, що на порядок більше нинішнього світового річного випуску електролізерів [1].

Зберігання водню. У Канаді оцінили потенціал великомасштабного сезонного підземного зберігання водню (underground hydrogen storage, UHS) у геологічних формаціях країни. UHS має безліч переваг порівняно із звичайними надземними сховищами, зокрема більш високий тиск зберігання, меншу площу зайнятої поверхні, більш високі стандарти безпеки, менший вплив на навколишнє середовище, більш тривалий термін служби і зниження питомих інвестиційних витрат. Кращими місцями для UHS є соляні печери, глибокі водоносні горизонти, виснажені родовища нафти і газу, а також кам'яні печери. Соляні печери є найперспективнішим варіантом через низькі інвестиційні витрати і герметичність [9].

У 2021 р. у Німеччині компанія EWE планує будівництво печерного сховища водню. Випробувальна печера для 100-відсоткового водню об'ємом 500 м^3 буде побудована на глибині 1000 м . Обсяг печери достатній для одночасного зберігання 5-6 т водню [10].

Вартість зеленого водню. За даними британської аналітичної компанії Aurora Energy Research, загальне річне споживання водню в Європі у 2020 р. становило 327 ТВт·год, із яких найбільша частка припадала на Німеччину, Нідерланди і Францію. До 2050 р. попит на водень в Європі має зрости у вісім разів, тобто до 2500 ТВт·год на рік. У роботі «Перспективи водневої економіки» (Hydrogen Economy Outlook) дослідницької компанії BloombergNEF стверджується, що до 2050 р. у більшості регіонів світу «зелений» водень у поєднанні із суттєвим зменшенням витрат на отримання електроенергії з ВДЕ може вироблятися за ціною від 0,8 до 1,6 дол. США/кг, а в багатих ВДЕ країнах вартість може бути ще нижчою. Витрати на виробництво «зеленого» водню знижуються швидше, ніж очікувалося. З урахуванням витрат на зберігання і транспортну інфраструктуру вартість «зеленого» водню із доставкою в Китай, Індію або Західну Європу може знизитися приблизно до 2 дол./кг у 2030 р. та 1 дол./кг у 2050 р. У сприятливих щодо ВДЕ регіонах «зелений» і «сірий» водень можуть знаходитися на однаковому ціновому рівні уже у 2028 р., а в інших регіонах – між 2032 і 2034 рр. До 2030 р. водень може бути навіть дешевшим за традиційне викопне паливо. Транспортування водню трубопроводами із Північної Африки до Німеччини може здійснюватися за ціною 0,5 дол. США/кг. За даними Європейської комісії, у 2020 р. «сірий» водень на основі викопного палива коштує близько 1,50 євро/кг, або 1,81 дол. США/кг, тоді як орієнтовна вартість «синього» водню, отриманого із природного газу з уловлюванням вуглецю, становить 2 євро/кг (або 2,42 дол. США/кг). «Зелений» водень коштує від 2,50 євро/кг до 5,50 євро/кг (або від 3,02 до 6,65 дол. США/кг) [1 – 3, 11, 12].

Згідно з аналітичними дослідженнями IHS Markit витрати на виробництво «зеленого» водню з 2015 р. зменшилися на 50% і можуть знижуватися ще на 30% до 2025 р. завдяки перевагам великих масштабів виробництва і технологічних удосконалень. До 2030 р. «зелений» водень буде конкурентоспроможним за ціною порівняно із «сірим» та «синім» воднем [13].

За даними дослідження Wood Mackenzie, вартість виробництва «зеленого» водню до 2040 р. знизиться на 64% в умовах зростання ринку і зрівняється із воднем на основі викопного палива. У деяких країнах, таких як Німеччина, це станеться до 2030 року. Зростання цін на викопне паливо підвищить конкурентоспроможність «зеленого» водню [14]. За останнє десятиліття сві-

товий попит на водень виріс на 28%, досягнувши піку у 2020 році. На 10 провідних країн припадає 70% світового попиту, із них на Китай і США – 21 і 19% відповідно; загалом 85 країн використовують водень [15].

Перспективи виробництва «зеленого» водню у світі. За прогнозом компанії Bloomberg NEF, падіння цін на «зелений» водень призведе до того, що він у 2050 р. забезпечуватиме 24% світових потреб в енергії, а глобальні викиди від викопного палива зменшаться на третину. За даними іншого джерела – Водневої ради (Hydrogen Council) – водень до 2050 р. забезпечуватиме до 18% кінцевого споживання енергії на планеті. До 2030 р. річний попит на «зелений» водень прогноують на рівні 8,7 млн. т [1, 2].

Деякі країни із надзвичайно високим потенціалом ВДЕ і великими неосвоєними територіями (наприклад, Алжир, Об'єднані Арабські Емірати та Австралія) мають переваги у виробництві «зеленого» водню і можуть стати його експортерами в Європейський Союз (ЄС), особливо якщо наявні газопроводи можна буде перепрофілювати для транспортування водню. У більш довгостроковій перспективі усе зводиться до конкуренції між конкретними технологіями із нульовим викидом та їхньою економічністю.

У спільному дослідженні McKinsey і Hydrogen Council проаналізовано перспективи водневих проєктів у всьому світі та оцінено потенціал водню щодо енергетичного переходу до кліматично нейтрального суспільства. Визначено 228 великих проєктів, 85% з яких належать Європі, Азії та Австралії. Якщо всі заявлені проєкти будуть реалізовані, загальний обсяг інвестицій до 2030 р. перевищить 300 млрд. дол. США. Водень може стати найбільш конкурентоспроможним безвуглецевим рішенням для більш ніж 20 застосувань до 2030 р., зокрема для далеких вантажних і морських перевезень, аміачних, нафтопереробних і металургійних підприємств [16, 17].

Європейський Союз. В Європейській водневій стратегії («Воднева стратегія для кліматично-нейтральної Європи (ЄС)») вказується, що пріоритетом є відновлюваний водень (renewable hydrogen), вироблений із використанням енергії вітру і сонця. Водень зможе забезпечувати зберігання енергії для балансування змінних потоків ВДЕ. У стратегії викладено трьохетапний план, який починається із будівництва електролізерів для виробництва «зеленого» водню для подальшого використання у промисловості (сталеливарної, хімічної, нафтопереробної) до 2024 р.,

надалі створюватимуться локальні виробництва водню (до 2030 р.), які будуть пов'язані між собою задля формування великої європейської водневої інфраструктури. У період 2030-2050 рр. чисті водневі технології будуть широко використовуватись у важкій промисловості. Європейський союз планує до 2024 р. мати 6 ГВт електролізерів для «зеленого» водню, які вироблятимуть до 1 млн. т «зеленого» водню, а до 2030 р. – до 40 ГВт електролізерів, які вироблятимуть 10 млн. т водню, а також 120 ГВт вітрових і сонячних електростанцій для них. Очікується, що в ЄС до 2030 р. будуть інвестовані 40 млрд. євро у виробничі потужності для «зеленого» водню. До 2050 р. сукупні інвестиції у «зелений» водень в ЄС можуть становити до 180-470 млрд. євро [1, 13, 18].

Для вирішення проблем, пов'язаних із побудовою європейської і світової водневої економіки, надзвичайно важливим є злагоджене і своєчасне співробітництво країн.

Німеччина. Міністерством економіки та енергетики Німеччини розроблена Національна воднева стратегія (Nationale Wasserstoffstrategie), в якій у межах плану із скорочення викидів парникових газів у країні відображено збільшення виробництва і використання водню. Воднева стратегія допоможе прискорити енергетичний перехід Німеччини. Водень, отриманий із природного газу із використанням уловлювання і зберігання вуглецю, має використовуватись тільки «на перехідному етапі». Згідно зі стратегією Німеччина має на меті будівництво промислових підприємств із виробництва водню загальною потужністю 5 ГВт до 2030 р. разом із потрібними береговими і морськими ВДЕ. До 2040 р. країна планує встановити 10 ГВт електролізних потужностей. Окрім того, планується використати частину наявних газопроводів для транспортування водню. Згідно зі стратегією Німеччина виділить 7 млрд. євро на розвиток водневих технологій, ще 2 млрд. євро будуть інвестовані у створення потужних заводів із виробництва водню у країнах-партнерах. Німеччина є країною з високим споживанням енергії, яка має намір імпортувати великі обсяги «зеленого» водню у майбутньому, оскільки у країні не вистачає місця для установки величезної кількості потужних електростанцій на ВДЕ. Задля цього потрібно створювати транспортну інфраструктуру. Вартість виробництва «зеленого» водню в усьому світі значно відрізняється. Виробництво водню шляхом електролізу у країнах із кращими вітряними і сонячними можливостями приблизно на 40% є дешевшим, ніж у Німеччині

(з енергією від морських вітряних турбін). Нині у Німеччині діючий газопровід уперше переводиться на чистий водень. Моніторинг має підтвердити, що водень не впливає на структуру матеріалу труби і герметичність наявного обладнання. До цього часу у Німеччині існував технічний стандарт, який обмежує додавання максимум 10% водню (за об'ємною часткою) у газотранспортну мережу природного газу. У межах проєкту перевіряється, чи можна використовувати наявну інфраструктуру для транспортування і розподілення чистого водню. Модернізація газової мережі для використання водню є важливою передумовою успіху енергетичного переходу [1, 19, 20].

Німецька промислова компанія Uniper за поетапної відмови від вугілля планує протягом п'яти років переоснастити своє вугільне енергетичне обладнання на виробництво електроенергії із використанням «зеленого» водню. Компанія Siemens Gas and Power надає їй технічну підтримку. Газова компанія Linde приступила до будівництва заводу із виробництва і зріджування «зеленого» водню на хімічному і нафтопереробному заводах. Електролізний завод потужністю 24 МВт буде найбільшим у світі після його введення в експлуатацію у 2022 р. Завод працюватиме від ВДЕ. Щорічно має вироблятися до 3200 т «зеленого» водню. Електролізер буде побудовано на основі високоефективної технології PEM (протонообмінної мембрани). Електролізери PEM – це найбільш економічний спосіб виробництва «зеленого» водню із ВДЕ, оскільки вони здатні витримувати їх переривчасту роботу [5].

Нідерланди. У Нідерландах розроблено план розвитку водневої енергетики до 2030 р. вартістю 2,8 млрд. євро, який містить 33 інвестиційних проєкти. Потужність установок для електролізу води планують довести до гігаватного рівня. Окрім того, планують будівництво підземного водневого сховища в соляних печерах. У планах передбачають розроблення і будівництво «водневих» вітрових турбін із вбудованими електролізерами. Нафтогазовий концерн Royal Dutch Shell і голландська газова інфраструктурна компанія Gasunie оприлюднили плани найбільшого в Європі підприємства для виробництва екологічно чистого водню з використанням офшорних вітрових електростанцій електричною потужністю до 10 ГВт у Північному морі, здатних до 2040 р. виробляти 800 тис. т водню на рік. Необхідні інвестиційні вкладення тільки у будівництво 10 ГВт офшорних вітрових електростанцій оцінюють приблизно у 30 млрд. дол. США [21].

Окрім того, компанії Shell, Mitsubishi Heavy Industries (MHI) і Vattenfall вивчають, якою мірою діюча інфраструктура на місці вугільної електростанції може використовуватися для вироблення енергії із ВДЕ; планується виробництво «зеленого» водню із використанням сонячних і вітряних електростанцій та будівництво електролізера потужністю 100 МВт [21].

Франція. У межах своєї водневої стратегії Франція оприлюднила план вартістю 7 млрд. євро із створення до 2030 року 6,5 ГВт водневих потужностей. Генеруюча компанія EDF (оператор усіх атомних електростанцій Франції і найбільший оператор АЕС у світі) оголосила про створення компанії Hynamics, яка здійснюватиме розвиток водневої енергетики. Для отримання водню використовуватиметься насамперед електроенергія, вироблена 58 наявними у Франції атомними енергоблоками, а також електрика із ВДЕ [1].

Данія. Компанія Ерстед, найбільший у світі розробник офшорних вітроелектростанцій, планує до 2025 р. інвестувати 30 млрд. дол. США у проекти, які використовуватимуть енергію вітру для виробництва водневого палива. У прибережному пілотному проєкті буде випробувано електролізер мегаватного масштабу для роботи у морському середовищі. Електролізна система буде інтегрована із морською вітряною турбіною. Проєкт також об'єднуватиме процеси опріснення та очищення води, що дозволить використовувати морську воду під час електролізу [22].

Італія. Енергетичні компанії Enel і Eni розробляють два проєкти із виробництва екологічно чистого водню за допомогою електролізерів, які працюють із використанням ВДЕ, поблизу двох нафтопереробних заводів. Кожен проєкт міститиме електролізери потужністю близько 10 МВт, які почнуть виробляти «зелений» водень до 2022-2023 рр. Розташування електролізерів поруч із нафтопереробними заводами дозволить уникнути будівництва складної транспортної інфраструктури для переміщення водню [23].

Росія. У Росії при Кольській АЕС створено інфраструктуру для відпрацювання технологій водневої енергетики; опрацьовують варіанти використання надлишків електроенергії атомних електростанцій із метою виробництва водню. Воднева енергетика введена до переліку пріоритетних напрямів технологічного розвитку [1].

Австралія. В Австралії планується масштабне виробництво відновлюваного водню, яке вважають ключовим рішенням проблеми зберігання і транспортування енергії за одночасного ско-

рочення викидів парникових газів. Проєкт вартістю 300 млн. доларів було розроблено компанією Infinite Blue Energy, яка планує побудувати і ввести в експлуатацію у 2022 р. найбільший в Австралії завод із виробництва водню потужністю 25 т «зеленого» водню на добу із використанням тільки вітрової і сонячної електроенергії [24]. Азіатський центр відновлюваної енергії AREH планує використовувати ВДЕ в Австралії, виділяючи до 23 ГВт потужностей для виробництва «зеленого» водню з морської води. Прогнозована ціна водню буде нижче 2 доларів за кілограм, за якої він стає конкурентоспроможним порівняно з іншими джерелами енергії [25]. Компанія Hydrogen Park South Australia (HyP SA) вводить в експлуатацію електролізер потужністю 1,25 МВт, здатний виробляти 480 кг зеленого водню на добу. Після його повного введення в експлуатацію у 2020 р. з'явилася можливість подавати 5% «зеленого» водню у газотранспортну мережу природного газу. HyP SA розробляє плани щодо безпечного переходу на 100% водень (або водень плюс біогаз) у своїй мережі до 2050 р. [26].

Перше у світі судно Suiso Frontier японської компанії Kawasaki Heavy Industries для транспортування водню спустили на воду у 2020 р. Це судно є результатом спільної роботи австралійського та японського бізнесу за фінансової підтримки цих двох держав. Судно призначене для транспортування морем на великі відстані зрідженого до 1/800 від свого початкового обсягу водню, охолодженого до температури -253°C , що стало можливим завдяки новому вантажному танкеру LH2 об'ємом 1250 м^3 із подвійною оболонкою, між внутрішньою і зовнішньою стінкою якого знаходиться вакуум. Танкер створений на основі технологій, призначених для зберігання рідкого ракетного палива. Для того, щоб це судно могло завантажувати і відвантажувати водень, були побудовані термінали з його конвертації у зріджений стан і регазифікації зрідженого водню (в японському місті Кобе та австралійському місті Латроб-Веллі). В Австралії побудований завод із газифікації бурого вугілля і виробництва очищеного водню. Перша партія зрідженого водню з Австралії має прийти до Японії навесні 2022 р. Усього Kawasaki Heavy Industries планує побудувати 80 LH2-танкерів для перевезення 9 млн. т зрідженого водню [27].

Китай. У 2019 р. Китайська воднева асоціація China Hydrogen Alliance повідомила про плани водневої енергетики і паливних елементів, згідно з якими у короткостроковій перспективі

(2020-2025 рр.) обсяг промислового виробництва водневої промисловості у країні досягне 148 млрд. дол. США, а парк автомобілів на паливних елементах у Китаї становитиме 50000 одиниць із інфраструктурою у вигляді 200 водневих заправок. У 2026-2035 рр. обсяг витрат на промислове виробництво зростатиме до 740 млрд. дол. США, кількість водневих автомобілів досягне 15 млн. одиниць, а водневих паливних заправок – до 1500 станцій. До 2050 р. водень становитиме 10% від енергоспоживання Китаю (60 млн. т H_2 /рік). До 2030 р. Китай планує мати 2 млн. автомобілів на водневих паливних елементах. За даними Bloomberg, китайські інвестиції у водневий транспорт до 2023 р. становитимуть понад 17 млрд. дол. США, з яких Китайська національна корпорація важковантажних перевезень вкладатиме 7,6 млрд. дол. США. Окрім того, буде налагоджено масштабне виробництво паливних елементів і побудована мережа високотехнологічних АЗС. Водневі автомобілі доповнять електричні, для яких Китай вже став найбільшим ринком [1].

Сполучені Штати Америки. Міністерство енергетики США опублікувало Стратегію розвитку водневої енергетики, яка відкриває шлях до стійкого довгострокового економічного зростання. Ключовим аспектом стратегії є забезпечення виробництва водню із різноманітного набору низьковуглецевих внутрішніх джерел енергії, зокрема із ВДЕ, ядерної енергії і викопного палива (з уловлюванням, використанням і зберіганням вуглецю) [28].

Канада. Уряд Канади наприкінці 2020 р. оприлюднив нову стратегію країни із розвитку водневої економіки. У документі підкреслено, що розвиток водневої промисловості може призвести до створення 350 000 нових робочих місць у різних секторах економіки до 2050 року. Очікують, що паливо із нульовим рівнем викидів забезпечить близько 6% кінцевого споживання енергії у Канаді до 2030 р. і близько 30% - до 2050 р. Водночас Канада має значний потенціал для великомасштабного сезонного підземного зберігання водню у геологічних формаціях [29].

Україна. Міністерство енергетики України у жовтні 2020 р. повідомило про плани проведення досліджень потенціалу і можливостей упровадження в Україні безвуглецевої водневої енергетики, яка ґрунтується на ВДЕ. Дослідження мають містити обґрунтування можливих технологій, етапів і кількісних показників отримання водню, зокрема завдяки енергії вітру і сонця; визначення можливостей споживання водню в Україні,

зокрема як засобу тривалого зберігання енергії, палива, сировини у промисловості, експортного потенціалу; визначення найоптимальніших зон для здійснення пілотних проєктів із виробництва водню тощо. Очікується, що «Нафтогаз» і «Енергоатом» будуть спільно розвивати водневу енергетику в Україні [30].

У жовтні 2020 р. Міненерго України представило у Німеччині перелік потенційних інвестиційних проєктів із виробництва водню. У Міненерго України заявляють, що питання розвитку водневої енергетики та у цьому контексті перспективи використання інфраструктури газотранспортної системи України нині на порядку денному через значні зміни в економічній та енергетичній сферах, а також через розвиток водневих технологій у країнах ЄС. Україну розглядають як можливого постачальника водню у Німеччину. Задля забезпечення транспортування «зеленого» водню в ЄС можливе використання потужностей газотранспортної системи України (ГТС). Це питання має бути додатково опрацьовано спільно з експертами ЄС для визначення відповідних маршрутів і комплексу заходів щодо забезпечення надійності і безпеки роботи ГТС із новим енергоносієм [31].

У світі все більше країн оцінюють свої відновлювані ресурси, природні властивості, можливості рентабельного транспортування «зеленого» водню і позиціонують себе як експортери екологічно чистого водню. У роботі [32], опублікованій у лютому 2021 р., вказано, що привабливі перспективи у геополітичній гонці за екологічно чисту водневу економіку, особливо з європейського погляду, має Україна, яка має сонячні і вітрові ресурси, трубопроводи в Європу і політичну зацікавленість в енергонезалежності.

У вересні 2021 р. чотири провідні компанії газотранспортної інфраструктури EUSTREAM (компанія-оператор ГТС Словаччини), Оператор ГТС України (ОГТСУ), NET4GAS (компанія-оператор ГТС Чехії) та OGE (провідна компанія-оператор ГТС Німеччини), заявили про об'єднання зусиль задля створення водневої магістралі через Центральну Європу з України до Німеччини. Цей Центрально-Європейський водневий коридор для транспортування чистого водню в обсязі до 120 ГВт·год на добу (що в енергетичному еквіваленті дорівнює 11,4 млн. m^3 природного газу або до 4 млрд. m^3 на рік) може бути створений частково за рахунок перепрофілювання наявної газотранспортної інфраструктури у поєднанні із цільовими інвестиціями у нові спеціалізовані водневі трубопроводи та компресорні станції, що

дозволить забезпечити транспортування водню на великі відстані за доступною ціною [33]. Слід зазначити, що за останні роки Україна щорічно імпортувала до 10 млрд. м³ природного газу.

Німецька Siemens Energy та український енергохолдинг "ДТЕК" за підтримки урядів двох країн узгодили пілотний проєкт із будівництва заводу із виробництва водню на металургійному комбінаті гірничо-металургійної групи "Метінвест" у місті Маріуполь (Донецька область, Україна), за яким передбачено встановити обладнання для електролізу води потужністю 8,5 МВт і вартістю 25 млн. євро [34].

Висновки. Нині водень претендує на статус одного з основних каталізаторів енергетичної трансформації у напрямку сталого розвитку су-

спільства із всеохоплюючим застосуванням відновлювальних джерел енергії. Воднева економіка активно розвивається в усьому світі. Водень, вироблений методом електролізу із використанням вітрової або сонячної електроенергії, у майбутньому посідатиме важливе місце у багатьох сферах економічної діяльності. З метою скорочення викидів парникових газів, насамперед двоокису вуглецю, країни світу все більше покладаються на використання «зеленого» водню як кліматично нейтрального джерела енергії, розробляють і починають активно втілювати національні водневі стратегії. За прогнозами експертів, до 2050 р. попит на водень тільки в Європі має зрости у вісім разів порівняно з 2020 р. (до 2500 ТВт·год на рік).

Список літератури:

1. Водородная Энергетика. URL: <https://energy.hse.ru/hydroenergy> (дата звернення 01.09.2021).
2. Vorrath S. BNEF: Renewable hydrogen can replace gas in power generation. URL: <https://ieefa.org/bnef-renewable-hydrogen-can-replace-gas-in-power-generation/> (дата звернення 10.09.2021).
3. Dierman R. Aurora Energy Research erwartet in Europa Verachtfachung der Wasserstoff-Nachfrage bis 2050. URL: <https://www.pv-magazine.de/2020/11/04/aurora-energy-research-erwartet-in-europa-verachtfachung-der-wasserstoff-nachfrage-bis-2050/> (дата звернення 03.09.2021).
4. Hering G. Mitsubishi wins orders for hydrogen-compatible turbines at three planned U.S. gas-fired projects. URL: https://ieefa.org/mitsubishi-wins-orders-for-hydrogen-compatible-turbines-at-three-planned-u-s-gas-fired-projects/?utm_source=rss&utm_medium=rss&utm_campaign=mitsubishi-wins-orders-for-hydrogen-compatible-turbines-at-three-planned-u-s-gas-fired-projects&utm_source=Weekly+IEEFA+Newsletter&utm_campaign=f3e6b8e2e5-IEEFA_WeeklyDigest&utm_medium=email&utm_term=0_30c2b8506b-f3e6b8e2e5-128745689 (дата звернення 03.09.2021).
5. Iron and Steel Technology Roadmap. Towards more sustainable steelmaking. Chapter 2. The future of steelmaking. International Energy Agency (IEA).2020. 190 p. URL: <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap> (дата звернення 06.09.2021).
6. Yu Yong. Low-carbon development at HBIS. World Steel Association. URL: <https://www.worldsteel.org/media-centre/blog/2021/Low-carbon-development-at-HBIS.html> (дата звернення 06.09.2021).
7. Radowitz B. Linde announces major green hydrogen investment. URL: <https://ieefa.org/linde-announces-major-green-hydrogen-investment/> (дата звернення 01.09.2021).
8. Global green hydrogen project pipeline tops 60GW—Rystad Energy. URL: https://ieefa.org/global-green-hydrogen-project-pipeline-tops-60gw-rystad-energy/?utm_source=rss&utm_medium=rss&utm_campaign=global-green-hydrogen-project-pipeline-tops-60gw-rystad-energy (дата звернення 13.09.2021).
9. Bellini E. Underground hydrogen storage in Canada. URL: <https://www.pv-magazine.com/2020/11/05/underground-hydrogen-storage-in-canada/> (дата звернення 08.09.2021).
10. Dierman R. EWE baut Kavernenspeicher für Wasserstoff. URL: <https://www.pv-magazine.de/2020/12/18/ewe-baut-kavernenspeicher-fuer-wasserstoff/> (дата звернення 05.09.2021).
11. Chestney N., Abnett K. Green hydrogen's time has come, say advocates eyeing post-pandemic world. URL: <https://www.reuters.com/article/us-health-coronavirus-hydrogen-analysis/green-hydrogens-time-has-come-say-advocates-eying-post-pandemic-world-idUSKBN22K0MJ> (дата звернення 12.09.2021).
12. Naschert C. Norwegian electrolyzer firm seeks price parity for green hydrogen by 2025. URL: <https://ieefa.org/norwegian-electrolyzer-firm-seeks-price-parity-for-green-hydrogen-by-2025/> (дата звернення 04.09.2021).
13. Willuhn M. IHS Markit says green hydrogen will be cost competitive by 2030. URL: https://ieefa.org/ihs-markit-says-green-hydrogen-will-be-cost-competitive-by-2030/?utm_source=rss&utm_medium=rss&utm_campaign=ihs-markit-says-green-hydrogen-will-be-cost-competitive-by-2030&utm_source=Weekly+IEEFA+Newsletter&utm_campaign=91d75e527d-IEEFA_WeeklyDigest&utm_medium=email&utm_term=0_30c2b8506b-91d75e527d-128745689 (дата звернення 07.09.2021).
14. Parnell J. Wood Mackenzie: 2020s will be the 'decade of hydrogen'. URL: <https://ieefa.org/wood-mackenzie-2020s-will-be-the-decade-of-hydrogen/> (дата звернення 11.09.2021).

15. Hydrogen production costs to 2040: Is a tipping point on the horizon? URL: https://www.woodmac.com/our-expertise/focus/transition/hydrogen-production-costs-to-2040-is-a-tipping-point-on-the-horizon/?utm_campaign=energy-transition&utm_medium=article&utm_source=gtm&utm_content=hydrogen-costs (дата звернення 12.09.2021).
16. Hannen P. Wasserstoff-Großprojekte für mehr als 300 Milliarden US-Dollar in der Pipeline. URL: <https://www.pv-magazine.de/2021/02/19/wasserstoff-grossprojekte-fuer-mehr-als-300-milliarden-us-dollar-in-der-pipeline/> (дата звернення 03.09.2021).
17. Matich B. Global hydrogen project pipeline expected to exceed \$300 billion by 2030. URL: <https://www.pv-magazine.com/2021/02/18/global-hydrogen-project-pipeline-expected-to-exceed-300-billion-by-2030/> (дата звернення 15.09.2021).
18. Appunn K. EU releases plan for sharp increase in green hydrogen production capacity by 2030. URL: https://ieefa.org/eu-releases-plan-for-sharp-increase-in-green-hydrogen-production-capacity-by-2030/?utm_source=rss&utm_medium=rss&utm_campaign=eu-releases-plan-for-sharp-increase-in-green-hydrogen-production-capacity-by-2030&utm_source=Weekly+IEEFA+Newsletter&utm_campaign=9dfef03f73-IEEFA_WeeklyDigest&utm_medium=email&utm_term=0_30c2b8506b-9dfef03f73-128745689 (дата звернення 08.09.2021).
19. Appunn K. Freja Eriksen Julian Wettengel Germany's greenhouse gas emissions and energy transition targets. URL: <https://www.cleanenergywire.org/news/german-hydrogen-strategy-aims-global-leadership-energy-transition> (дата звернення 03.09.2021).
20. Energiewirtschaftliches Institut (EWI). Grüner Wasserstoff: Weltweit große Kostenunterschiede und hohe Transportkosten. URL: <https://www.pv-magazine.de/unternehmensmeldungen/gruener-wasserstoff-weltweit-grosse-kostenunterschiede-und-hohe-transportkosten/> (дата звернення 10.09.2021).
21. Enkhardt S. Erzeugung von grünem Wasserstoff in großem Stil am bisherigen Kohlekraftwerkstandort in Hamburg geplant. URL: <https://www.pv-magazine.de/2021/01/22/erzeugung-von-gruenem-wasserstoff-in-grossem-stil-am-bisherigen-kohlekraftwerkstandort-in-hamburg-geplant/> (дата звернення 05.09.2021).
22. Naschert C. EU funds Ørsted pilot project to produce green hydrogen with offshore wind. URL: https://ieefa.org/eu-funds-orsted-pilot-project-to-produce-green-hydrogen-with-offshore-wind/?utm_source=rss&utm_medium=rss&utm_campaign=eu-funds-orsted-pilot-project-to-produce-green-hydrogen-with-offshore-wind (дата звернення 07.09.2021).
23. Enel, Eni form green hydrogen partnership in Italy. URL: https://ieefa.org/enel-eni-form-green-hydrogen-partnership-in-italy/?utm_source=rss&utm_medium=rss&utm_campaign=enel-eni-form-green-hydrogen-partnership-in-italy (дата звернення 11.09.2021).
24. Mazengarb M. Australian company secures funding for major green hydrogen project. URL: https://ieefa.org/australian-company-secures-funding-for-major-green-hydrogen-project/?utm_source=Weekly+IEEFA+Newsletter&utm_campaign=4a305de28d-IEEFA_WeeklyDigest&utm_medium=email&utm_term=0_30c2b8506b-4a305de28d-128745689 (дата звернення 09.09.2021).
25. Filatoff N. \$50 Billion green hydrogen hub gets Federal Government Guernsey. URL: https://www.pv-magazine-australia.com/2020/10/25/50-billion-green-hydrogen-hub-gets-federal-government-guernsey/?utm_source=Biblio&utm_campaign=Internal (дата звернення 14.09.2021).
26. Filatoff N. Australian green hydrogen project secures first commercial offtaker. URL: <https://www.pv-magazine.com/2020/10/28/australian-green-hydrogen-project-secures-first-commercial-offtaker/> (дата звернення 05.09.2021).
27. World's First Liquefied Hydrogen Carrier SUIISO FRONTIER Launches Building an International Hydrogen Energy Supply Chain Aimed at Carbon-free Society URL: https://global.kawasaki.com/en/corp/newsroom/news/detail/?f=20191211_3487 (дата звернення 01.09.2021).
28. Министерство энергетики США опубликовало стратегию развития водородной энергетики. URL: <https://www.atomic-energy.ru/news/2020/11/17/108920> (дата звернення 01.09.2021).
29. Bellini E. Canada joins hydrogen race with dedicated strategy. URL: <https://www.pv-magazine.com/2020/12/21/canada-joins-hydrogen-race-with-dedicated-strategy/> (дата звернення 03.09.2021).
30. Міненерго оголосило тендер на проведення дослідження потенціалу водневої енергетики в Україні. URL: <https://kosatka.media/uk/category/gaz/news/minenergo-obyavilo-tender-na-provedenie-issledovaniya-potenciala-vodorodnoy-energetiki-v-ukraine> (дата звернення 11.09.2021).
31. Міненерго представило в Німеччині портфель потенційних проєктів для вироблення водню. URL: <https://kosatka.media/uk/category/gaz/news/minenergo-predstavilo-v-germanii-portfel-potencialnyh-proektov-dlya-vyrabotki-vodoroda> (дата звернення 03.09.2021).
32. Matich B. The race for green hydrogen. URL: <https://www.pv-magazine.com/2021/02/13/the-weekend-read-what-asia-needs-to-turn-away-from-coal/> (дата звернення 10.09.2021).
33. Компанії газового сектору представляють Центрально-Європейський водневий коридор. Оператор ГТС України. URL: <https://tsoua.com/news/kompaniyi-gazovogo-sektoru-predstavlyayut-czentralno-evropejskij-vodnevyj-korydor/> (дата звернення 23.09.2021).

34. ДТЕК і Siemens за підтримки урядів узгодили водневий проект на EUR25 млн у Маріуполі. Інформаційне агентство Інтерфакс - Україна. URL: <https://ua.interfax.com.ua/news/greendeal/731349.html> (дата звернення 23.09.2021).

Shraiber O.A., Dubrovskiy V.V., Teslenko O.I. CURRENT STATE AND PROSPECTS OF HYDROGEN ENERGY DEVELOPMENT IN THE WORLD

This article presents the results of an analytical review of the current state and prospects for the development of hydrogen energy in European countries and in other countries. Currently, the use of hydrogen as a potential alternative to fossil carbon fuels claims the status of one of the main catalysts for energy transformation in the direction of sustainable development of society with the comprehensive use of renewable energy sources (RES). Hydrogen is considered primarily as an energy carrier capable of carrying excess energy produced from RES in those periods of the day or season when there is a shortage of energy in the energy system. "Green" hydrogen produced using wind or solar electricity by water electrolysis will in the future play an important role in the world economy and can be used to replace natural gas, both in energy and in industry or transport.

However, the production of extremely high-energy hydrogen by electrolysis of water requires a huge amount of electricity, which currently determines its higher cost than traditional fossil fuels. According to the European Commission for 2020, "gray" hydrogen based on fossil fuels costs about 1.50 euros / kg, the estimated cost of "blue" hydrogen obtained from natural gas with carbon capture is 2 euros / kg, "green" hydrogen costs from 2.50 euros / kg to 5.50 euros / kg. It should be noted that in terms of hydrogen use forecasts, the world is now in a similar situation to that with the proliferation of RES in 2000-2005. The next ten to fifteen years are probably enough time to make hydrogen more competitive. According to forecasts, by 2050 in most regions of the world "green" hydrogen in combination with a significant reduction in the cost of electricity from RES can be produced at a price of \$ 0.8 to 1.6 US / kg. Hydrogen can be transported by pipeline from North Africa to Germany for \$ 0.5 US / kg.

In the energy sector, gas turbines capable of operating on pure hydrogen, both at constant load and in maneuvering and peak operating modes, are a promising area of application of hydrogen as a fuel, which is necessary for balancing energy systems with a significant share of RES.

Hydrogen gas at a pressure of 350 bar can be used for heavy vehicles such as trucks, trains or construction equipment. The main technology for the production of steel from iron ore will be the technology of direct reduction of iron using hydrogen. By 2050, the share of the use of different fuels in metallurgy will change radically: coal consumption will be reduced by 40%, and electricity consumption will double. 30% of this electricity (or about 700 TWh) will be used to produce electrolytic hydrogen, which will require about 165 GW of electrical power from the cells. The Norwegian company Nel Hydrogen has started construction of the world's largest fully automated plant for the production of electrolyzers with a total capacity of 360 MW per year; which will supply cheap, but at the same time the most efficient electrolyzers.

A promising area of large-scale seasonal underground hydrogen storage (UHS) is its accumulation in geological formations.

According to forecasts, in 2050 hydrogen will provide 24% of global energy needs, and global emissions from fossil fuels will be reduced by a third, and by 2030 the annual demand for "green" hydrogen will increase to 8.7 million tons.

The European Hydrogen Strategy sets out a three-stage plan, which begins with the construction of electrolyzers for the production of "green" hydrogen for further use in industry (steel, chemical, refining) until 2024, and then creates local hydrogen production (until 2030), which will be interconnected to form a large European hydrogen infrastructure. In the period 2030 - 2050, pure hydrogen technologies will be widely used in heavy industry. The European Union plans to have 6 GW of electrolyzers for "green" hydrogen by 2024, which will produce up to 1 million tons of "green" hydrogen, and by 2030 up to 40 GW of electrolyzers, which will produce 10 million tons of hydrogen, and also up to 120 GW of wind and solar power plants for them. It is expected that the EU will invest 40 billion euros in production capacity for "green" hydrogen by 2030. By 2050, total investment in "green" hydrogen in Europe could reach 180 - 470 billion euros.

The analysis of features of hydrogen strategies of the European countries and other countries of the world is presented.

Key words: hydrogen, renewable energy sources, current state, development prospects.