

Володимир Георгійович Шевченко*д-р техн. наук*

ORCID 0000-0002-7290-811X

e-mail: V.Shevchenko@nas.gov.ua,

*Інститут геотехнічної механіки ім. Полякова**НАН України, м. Дніпро,***Вячеслав Іванович Ляшенко***д-р екон. наук*

ORCID 0000-0001-6302-0605

e-mail: slaval.aenu@gmail.com,

*Інститут економіки промисловості НАН України, м. Київ***Наталія Вікторівна Осадча***д-р екон. наук*

ORCID 0000-0001-5066-2174

e-mail: nosadcha86@gmail.com,

Інститут економіки промисловості НАН України, м. Дніпро

СВІТОВІ ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ВОДНЕВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

Вступ. Перехід до екологічно чистої енергетики – це магістральний напрям України, який визначатиме головні тренди розвитку економіки протягом наступних 30 років. Європа переходить до декарбонізованої енергетичної системи. Усі країни-члени ЄС підписали та ратифікували Паризьку угоду про зміни клімату, яка була розроблена у зв'язку з глобальним підвищенням температури у цьому столітті на 2°C від рівня доіндустріального періоду, з метою обмеження зростання температури до 1,5°C. Перехід до нової енергетичної моделі змінює уявлення щодо виробництва, поставки, зберігання та споживання енергії.

Метою ЄС є скорочення викидів вуглеводу на 80-95% до 2050 р. у порівнянні із 1990 р. Це означає майже повну декарбонізацію виробництва електроенергії та збільшення рівня використання відновлювальних джерел енергії. Країни, які підписали Паризьку угоду про зміну клімату у 2015 р., погодились докласти більше зусиль щодо скорочення викидів у повітря. У 2018 р. Міжурядова комісія із зміни клімату визначила необхідність зменшення антропогенних викидів CO₂, які повинні досягти нуля у 2050 р. Це пов'язано із зупиненням глобального підвищення температури, щоб величина підвищення була не вище 1,5°C.

Зниження витрат на відновлювані джерела енергії є поштовхом, що стимулює зростання потенціалу водню у світі. Низка країн і регіонів зараз мають амбітні цілі щодо видобування електроенергії з низьковуглеводних джерел. Так, Південна Австралія націлена на створення енергетичної системи на 100% з низьковуглеводних джерел до 2025 р., Швеція – до 2040 р., Каліфорнія – до 2045 р. та Данія – до 2050 р. Особливе значення має перехід економік країн на альтернативні види енергії, зокрема водневу енергетику.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Існування водню як хімічної речовини в природі з молекулярною формулою H₂ є недоступним, і він часто є у вигляді сполук, так званих гідридів, з негативним або аніонним характером, позначається (H⁻). Безпосереднє ви-

робництво водню в промисловості відбувається за рахунок парової конверсії вуглеводів. Крім цього, до інших технологій відносяться, наприклад, електроліз та термоліз [3-5]. Водень існує в надлишку і є джерелом найбільш доступної відновлюваної енергії. Крім того, від спалювання водню утворюється лише водяна пара. Таким чином, він вважається найчистішим джерелом енергії [6]. Водень також визначено підходящим рішенням екологічних проблем, якщо він виробляється з поновлюваних ресурсів. Перевагами водню є нульові викиди парникових газів, якщо він виробляється з використанням відновлюваної енергії, та висока щільність енергії між 120 МДж/кг (Lower Heating Value, LHV) і 142 МДж/кг (Higher Heating Value, HHV) [7; 8]. Можливість використання водню потребує оцінки, наприклад, можливостей зберігання, універсальності енергії, транспортування та впливу на навколишнє середовище. Виробництво водню з біопаливних ресурсів вважається одним з найперспективніших методів завдяки високому вмісту органічних речовин та їх доступності. Поживні речовини, що зберігаються у харчових відходах, знаходяться у вигляді макромолекул, які потребують гідролізу в мікромолекули, перш ніж їх можна буде використовувати як мікроорганізм для отримання біопалива. Тому процес гідролізу харчових відходів розглядається як обмежувальний крок для виробництва біопалива [9-11]. Науковці розробили нові методи твердотілого та темного бродиння на основі харчових відходів. Їх модель комбінованого біо-процесу дозволяє ефективно прискорити швидкість гідролізу, підвищити якість використання сировини та модифікувати вихідний біогаз. Це вважають перспективним методом отримання біогазу. Крім того, також було оцінено техніко-економічне обґрунтування запропонованого біо-процесу [10], щоб побачити ефект економічного впливу на технології виробництва водню. Виробничі витрати на водень потрібно зменшити, щоб він міг стати загальним джерелом енергії. Отже, сучасні та майбутні енергетичні системи повинні бути економічно ефективними, практичними, надійними

та мати низький вплив на навколишнє середовище [12].

Незважаючи на значну увагу науковців, проблема формування умов інноваційно-орієнтованого розвитку водневої енергетики в Україні потребує більш ретельного вивчення.

Мета статті – аналіз світових трендів та їх вплив на збільшення частки водневої енергетики.

Результати дослідження. Слід зазначити, що водень та енергія мають довгу спільну історію. Перші демонстрації електролізу води і паливних елементів захопили увагу інженерів у 1800-х роках. Для палива використовувався водень у перших двигунах внутрішнього згоряння ще 200 років тому.

Водень забезпечував підняття повітряних куль і дирижаблів у XVIII-XIX ст. Водень був невід'ємною частиною енергетичної системи промисловості з середини XX ст. [13].

Постачання водню промисловим споживачам зараз є великим бізнесом у всьому світі. Попит на водень зростає більше ніж утричі з 1975 р. та продовжує зростати. Потреба у водню у чистому вигляді становить близько 70 млн т/рік ($MtH_2/рік$). Цей водень майже повністю виробляється із світового природного газу та вугілля.

Водень легкий та простий у збереженні, енергоємний і при споживанні не відбувається прямих викидів забруднюючих речовин або парникових газів. Але для того, щоб водень став головним пріоритетним напрямом при переході до нової енергетичної системи, його потрібно впроваджувати в такі галузі як транспорт, будівництво та виробництво електроенергії.

Зростаючий інтерес до використання водню обумовлений наступним: 1) водень можна використовувати без прямих викидів та забруднення повітря; 2) його можна виготовити із низьковуглецевих джерел енергії.

Водень може сприяти стійкому, сталому енергетичному розвитку у майбутньому. Це може відбуватися двома шляхами:

1. Існуючі промислові підприємства можуть використовувати водень, вироблений альтернативними методами з інших джерел енергії.

2. Водень можна використовувати в широкому спектрі інших галузей. Наприклад, у транспорті, опаленні, виробництві сталі та електроенергії. Водень можна використовувати як у чистому вигляді, так і перетворити на паливо на основі водню, у т.ч. синтетичний метан, синтетичне рідке паливо, аміак та метанол.

Водень – універсальний енергоносіє, який може допомогти у вирішенні глобальних економічних проблем, він може вироблятися майже з усіх енергетичних ресурсів, хоча зараз використання водню в нафтопереробці та хімічному виробництві переважно покривається воднем із природного газу та вугілля.

Чистий водень, що виробляється з відновлюваних джерел, ядерного палива або вугілля може допомогти декарбонізувати цілий ряд секторів, включаючи транспорт та деякі види промисловості, зокрема виробництво добрива, сталі, в яких важко зменшити викиди у повітря.

Водень також може допомогти поліпшити якість повітря в містах та покращити енергетичну безпеку.

Слід зазначити, що у 2019 р. відбувається зростання попиту на водневі технології, що привернуло увагу політичних лідерів країн світу.

У 2019 р. ринок електромобілів з паливними елементами збільшився майже вдвічі завдяки надзвичайному розширенню виробництв їх в Китаї, Японії та Кореї. Однак існуючі низьковуглеводні виробничі потужності і досі не відповідають новим стандартам. Потрібно зробити додаткові кроки для зменшення витрат – замінити високовуглеводний на низьковуглеводний водень у галузях економіки; розширити використання водню в нових сферах [14].

Доктором Фатіхом Біролом, виконавчим директором МЕА, разом з паном Хіросіге Секо, міністром економіки, торгівлі та промисловості Японії, з нагоди зустрічі міністрів енергетики та навколишнього середовища G20 у Каруїдзаві (Японії), була написана доповідь «Майбутнє водню: використання сучасних можливостей», в якій відзначено, що чистий водень у майбутньому отримуватиме сильну підтримку урядів та компаній у всьому світі, а кількість проєктів щодо розвитку водневої енергетики швидко розшириться.

Водень може допомогти замінити різні види критичної енергії, допомогти у збереженні продукції відновлюваних джерел енергії, таких як сонячні батареї та вітер.

Водень може сприяти декарбонізації цілого ряду секторів, включаючи транспортування, виробництво хімікатів та сталі, в яких важко скоротити викиди у повітря. Перехід до водневої енергетики може допомогти поліпшити якість повітря та зміцнити енергетичну безпеку.

Водень можна виробляти із різних видів палива, а саме: з відновлюваних джерел, ядерної енергії, природного газу, вугілля та нафти. Водень можна транспортувати у вигляді газу трубопроводами або у рідкій формі на кораблях подібно до скрапленого природного газу (СПГ). Водень може бути перетворений на електроенергію та метан для забезпечення будівництва та харчової промисловості, а також використовуватися як паливо для автомобілів, вантажівок, кораблів та літаків.

Сьогодні до виробництва водню привернута увага урядів країн світу, які імпортують та експортують енергію, а також промислових галузей, що використовують відновлювані джерела енергії, автовиробників, нафтогазових компаній [16].

На основі аналізу світового попиту МЕА (Міжнародне енергетичне агентство) розробило рекомендації, які допоможуть урядам, компаніям та іншим зацікавленим сторонам розширити застосування водневих проєктів у всьому світі. В рекомендаціях визначені сфери, в яких доцільно зосередити зусилля для зростання світового виробництва чистого водню в найближчі роки, а саме: розширення використання водню у транспорті – в легкових автомобілях, вантажівках та автобусах, які курсують на ключових маршрутах.

Слід зазначити, що існують великі проблеми щодо розповсюдження водневої енергетики, оскільки виробництво водню з енергії з низьким вмістом вуглецю коштує достатньо дорого, розвиток водневої інфраструктури відбувається повільно, що стримує широкі впровадження водню; деякі нормативні акти наразі обмежують розвиток чистої водневої промисловості.

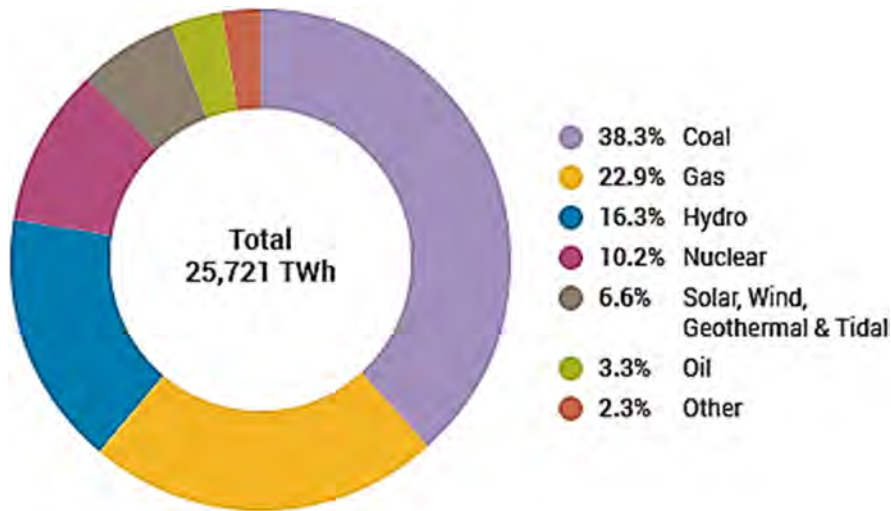
Сьогодні водень уже використовується в промислових масштабах, але він майже повністю виробляється з природного газу та вугілля. При його використанні у хімічній та нафтопереробній промисловості

здійснюється викид у повітря 830 млн т CO₂ на рік. Це еквівалент річних викидів вуглеводу у Великобританії та Індонезії разом узятих.

У світовому балансі воднева енергетика складає 16,3% (див. рисунок).

Скорочення викидів від існуючого виробництва водню є проблемою, для вирішення якої необхідно збільшити масштаби виробництва чистого водню у

всьому світі. Одним із підходів є збирання, зберігання та використання CO₂ від виробництва водню з вугілля. В даний час у всьому світі існує декілька промислових підприємств, що використовують дану технологію, і ще багато в стадії розробки. Цих підприємств недостатньо для переведення економік на суто водневу енергетику.



Source: IEA Electricity Information 2019

Рисунок. Світовий енергетичний баланс [40]

Інший підхід полягає у забезпеченні промисловості запасами водню за рахунок чистої електроенергії. За останні два десятиліття виникло понад 200 проєктів з перетворення електроенергії та води у водень для зменшення викидів від транспорту, для створення єдиної інтегрованої енергетичної системи відновлюваних джерел з іншими. Розширення використання чистого водню в інших секторах – таких як легкові автомобілі, вантажівки, виробництво металоконструкцій та опалювальні будівлі – є ще однією важливою проблемою. В даний час по всьому світу на дорогах існує близько 11 200 автомобілів з водневим двигуном. Більшість урядів країн вимагають, щоб ця цифра різко зросла до 2,5 млн до 2030 р. Але керівники урядів повинні переконатися, що ринкові умови будуть адаптовані для досягнення таких амбітних цілей. Сучасні успіхи виробництва та використання сонячних, фотоелектричних, вітрових, акумуляторних та електричних засобів показали, що інноваційні політики та технології мають великий потенціал щодо створення світової системи виробництва чистої енергії. Слід зазначити, що МЕА ідеально підходить щодо створення фундаменту для глобальних рекомендаційних програм формування політики щодо водню.

Для цього МЕА аналізує енергетичний ринок та надає рекомендації щодо технологій, політики на енергетичному ринку [20].

МЕА організовує діалог з урядами та іншими зацікавленими сторонами з метою максимального використання потенціалу водню.

До переваг впровадження водню в економічні системи можна віднести такі:

1. Водень може допомогти у вирішенні широкого спектру проблем при декарбонізації економік. Його за-

стосування сприяє декарбонізації у широкому спектрі галузей, включаючи транспортування на далекі відстані, виробництво хімікатів, сталі. Це також може допомогти покращити якість повітря та посилити енергетичну безпеку. Незважаючи на дуже амбітні міжнародні кліматичні цілі, викиди у повітря CO₂ досягли рекордно високого рівня у 2018 р. Забруднення зовнішнього повітря також залишається актуальною проблемою, і щорічно близько 3 мільйонів людей передчасно помирають від цього.

2. Водень універсальний. Існуючі у світі технології дозволяють виробляти водень, зберігати, переміщати та використовувати. Його можна транспортувати як газ трубопроводами або у рідкому вигляді суднами, подібно до скрапленого природного газу (СПГ).

3. Водень може посилити роль відновлюваних джерел енергії. Водень є одним із стратегічних напрямів накопичення енергії із відновлюваних джерел енергії. Це дає можливість зберігання електроенергії протягом декількох днів, тижнів або навіть місяців. Виникає можливість транспортування енергії із відновлюваних джерел на великі відстані – з регіонів з великими сонячними та вітровими ресурсами, таких як Австралія чи Латинська Америка, до енергоємних міст за тисячі кілометрів.

Успіхи у застосуванні сонячних, фотоелектричних, вітрових, акумуляторних та електричних транспортних засобів створюють передумови щодо побудови світової промисловості чистої енергії.

Уряди більшості країн світу підтримують можливість щодо імпорту та експорту енергії, а також постачання відновлюваної електроенергії до електроенергетичних та газових підприємств, автовиробників, нафтогазових компаній. Інвестиції у водень можуть спри-

яти розвитку нового технологічного та промислового потенціалу в економіках світу, створенню кваліфікованих робочих місць.

4. Водень можна використовувати майже в усіх секторах економіки. Сьогодні водень використовується переважно в нафтопереробці та для виробництва добрива. Його використання майже повністю відсутнє у транспорті, будівництві та виробництві електроенергії.

Розповсюдженню використання водню є певні перепони:

1. Виробництво водню з низьковуглецевої енергії зараз дорого коштує. Аналіз МЕА виявляє, що вартість виробництва водню з відновлюваної електроенергії може знизитися на 30% до 2030 р. унаслідок зниження витрат на відновлювані джерела енергії та збільшення обсягу водневого виробництва [21].

Промислові підприємства та підприємства, що виробляють водень з води, можуть отримати великий прибуток від масового виробництва.

2. Розвиток водневої інфраструктури відбувається повільно. Ціни на водень для споживачів сильно залежать від кількості заправних станцій, як часто вони використовуються і скільки водню доставляється щоденно. Для вирішення цього питання необхідно здійснювати планування та координацію дій державних органів та місцевого самоврядування, промисловості та інвесторів.

3. Сьогодні водень майже повністю виробляється з природного газу та вугілля.

4. Існуючі у країнах нормативні акти обмежують розвиток галузі чистого водню. Уряд та промисловість повинні об'єднатися, щоб змінити існуючі нормативні акти для усунення бар'єрів щодо інвестицій.

До ключових рекомендацій МЕА щодо збільшення частки водню в економіці відносяться такі:

1. Посилити роль водню в довгострокових енергетичних стратегіях. До ключових галузей, в яких доцільно використовувати водень відносяться нафтопереробна промисловість, хімічна промисловість, виробництво сталі, вантажні перевезення, будівництво та виробництво і зберігання електроенергії.

2. Стимулювати комерційний попит на чистий водень. Чисті водневі технології є доступні, але витрати на виробництво залишаються великими. Необхідно надавати пільги та інвестувати у систему постачальників, дистрибуторів та користувачів у виробництві чистого водню. Розширювати ланцюжки поставок. Інвестиції у вуглецеву промисловість сприятимуть скороченню витрат за рахунок низьковуглецевої електроенергії та накопичування, зберігання та транспортування чистого водню.

3. Зменшення інвестиційних ризиків. Цільові позики, гарантії та інші інструменти можуть допомогти активізувати інвестування у водневу енергетику.

4. Підтримка НДДКР для зменшення витрат. НДДКР має вирішальне значення для зниження витрат та підвищення продуктивності водню, зокрема виробництва водню з води. При цьому використання державних пільг та гарантій має велике значення для залучення інвестицій.

5. Скасування непотрібних регуляторних бар'єрів та гармонізація стандартів. Розробники проєктів зіткнулися з перешкодами, де правила та вимоги щодо дозволів неясні, непридатні, або несумісні між секторами та країнами. Обмін знаннями та гармонізація

стандартів є одним з головних напрямів у переході до нової чистої енергетичної системи.

6. Скоординувати міжнародну співпрацю. Необхідно активізувати міжнародне співробітництво щодо стандартів, обміну передовим досвідом та створення інфраструктури. Необхідно контролювати виробництво та використання водню та відстежувати результати щодо досягнення довгострокових цілей.

7. Використовувати існуючі можливості для подальшого збільшення виробництва чистого водню. Необхідно скористатися усіма існуючими промисловими точками, щоб перетворити їх на хаби для виробництва чистого водню. Використовувати існуючу газову інфраструктуру, щоб стимулювати створення нових запасів чистого водню, підтримувати транспортні коридори, щоб збільшити кількість автомобілів з паливними елементами з водню. Створити перші морські шляхи, щоб почати міжнародну торгівлю воднем. Кількість країн, які встановлюють амбітні цілі щодо скорочення викидів парникових газів продовжує зростати, а разом із цим і кількість секторів, які розглядають можливість використання чистого водню. Оскільки водень можна зберігати або використовувати в різних секторах, його використання стає магістральним напрямом у світі. Якщо виробництво відновлюваних джерел енергії стане досить дешевим і розповсюдженим, це може бути використане не тільки для забезпечення низьковуглецевої електроенергії, але і для створення низьковуглецевого водню, який може витіснити вугільне паливо в транспорті, опаленні.

Слід зазначити вирішальну роль урядів країн світу у впровадженні водородної енергетики. Ризик того, що сьогоднішній інтерес до водню перетвориться на розчарування цілком реальний. Уряди країн світу відіграють головну роль у тому, щоб уникнути цього результату та допомогти водню реалізувати свій потенціал.

Більше 60% водню, що використовується сьогодні на нафтопереробних заводах виробляється з використанням природного газу. Нафтопереробні заводи використовують водень для зниження вмісту сірки в дизельному паливі. Попит НПЗ на водень збільшився в міру зростання попиту на дизельне паливо всередині країни та на міжнародному рівні, а також у зв'язку з посиленням норм щодо вмісту сірки.

Існує дві форми виробництва водню: спеціальне виробництво водню з використанням парових реформаторів метану та виробництво водню як побічний продукт інших хімічних процесів. Природний газ використовується майже виключно як вихідна сировина для спеціального виробництва водню в установках SMR у Сполучених Штатах. Нафтопереробні заводи, промислові виробники газу та інші виробники хімікатів використовують ту саму технологію SMR, яка на 90% ефективна у виробництві водню.

Побічний продукт, водень, можна отримати на хімічному заводі або іншому підприємстві, для якого водень не є основним продуктом. У хімічній промисловості виробляється водень як побічний продукт виробництва хлору, а нафтохімічні підприємства виділяють водень як побічний продукт виробництва олефінів. На нафтопереробних заводах також виробляється деяка кількість побічних продуктів водню в результаті каталітичного перетворення нафти на більш високоцінні продукти, але це постачання задовольняє лише частку їхніх потреб у водні.

Водневі паливні елементи виробляють електрику шляхом поєднання атомів водню та кисню. Водень реагує з киснем через електрохімічну комірку, подібну до батареї для виробництва електрики, води та невеликої кількості тепла. Існує багато різних типів паливних елементів для широкого спектру застосувань. Невеликі паливні елементи можуть жити портативні комп'ютери і навіть мобільні телефони, а також військові програми. Великі паливні елементи можуть подавати електроенергію для резервного або аварійного живлення в будівлях та подавати електроенергію в місцях, які не підключені до електромереж.

Інтерес до водню як транспортного палива базується на його потенціалі для внутрішнього виробництва та використанні для електромобілів з нульовим викидом. Використання водню в транспортних засобах є основним напрямком досліджень та розробок паливних елементів. У Сполучених Штатах кілька виробників транспортних засобів почали виробляти електромобілі з водневими паливними елементами в окремих регіонах, таких як Південна та Північна Каліфорнія, де є доступ до станцій заправлення з воднем.

Більшість транспортних засобів на водневому паливі – це автомобілі та транзитні автобуси, які мають електродвигун, що працює від водневого паливного елемента. Деякі з цих автомобілів спалюють безпосередньо водень. Висока вартість паливних елементів та обмежена доступність до водневих автостанцій не дають можливості щодо зростання транспортних засобів на водневому паливі.

Водень можна виробляти з різних джерел, включаючи воду, біомасу, і використовувати як джерело енергії або палива. Водень має найвищий вміст енергії серед будь-якого звичайного палива.

Для виробництва водню (відокремлюючи його від інших елементів у молекулах) потрібно більше енергії, ніж витрачає водень, коли він перетворюється на корисну енергію. Однак водень корисний як джерело енергії/паливо, оскільки має високий вміст енергії на одиницю ваги, тому його використовують як ракетне паливо та у паливних елементах для виробництва електрики на деяких космічних кораблях. Водень зараз не має широкого використання як паливо, але він має потенціал для більшого використання в майбутньому.

Екологічні тренди розвитку цивілізації, перехід до філософії промисловості 4.0 та технологічний прорив у цифрових технологіях та їх апаратному забезпеченні зумовили активне впровадження екологоефективних технологій генерації електричної енергії.

Сьогодні сектор електроенергетики та транспортний сектор України задовольняють свої енергетичні потреби переважно за допомогою традиційних видів палива – вугілля, газ, нафта та нафтопродукти – значна частина яких імпортується. Один з найбільш перспективних способів диверсифікації джерел виробництва носія енергії – це збільшення частки носіїв енергії, отриманих за допомогою використання відновлюваних джерел у структурі паливно-енергетичного балансу країни. Україна у своєму розвитку покладається на практики країн Європи, приймаючи до уваги угоду про асоціацію з ЄС, міжнародні угоди, зокрема, у енергетичному секторі. Енергетична стратегія України до 2035 р. передбачає збільшення частки «зеленої» енергії до 25% в енергетичному балансі країни, зменшення залежності енергетичного сектору України

від імпорту на до 33% у 2035 р., а також повна інтеграція з енергетичною системою ЄС. Цільовий показник відновлюваних джерел енергії у Національному плані дій у сфері відновлюваних джерел енергії знаходиться на рівні 11% від кінцевого споживання енергії.

Технології генерації електричної енергії з відновлювальних джерел також мають певні ризики та виклики, що зумовлюють обмеження у їх використанні. Так, сонячна енергетика має надмірну залежність від погодних умов, сезонних та добових змін, що є вагомим чинником – обмеженням щодо надійності енергогенерації. Необхідність використання значних площ також додає складнощів у збільшенні потужності станцій, хоча психологічний рубіж у 1 МВт для однієї сонячної електростанції подолано вже декілька років. Вітроенергетика також, як і сонячна, має надмірну залежність від погодних умов, що формує обмеження на райони її використання. Генерація електричної енергії з біопалива містить високу технологічну складність обладнання, що реалізує технологічний процес, який породжує різноманітність систем генерації та невисоку їх уніфікацію на відміну від класичних технологій генерації електричної енергії на теплових та атомних електростанціях. Зміни у структурі енергогенерації також викликають соціальні зрушення. Це необхідність забезпечення новими робочими місцями внаслідок формування нових галузей, заміщення економічних процесів із забезпечення класичної генерації електричної енергії, формування свідомого відношення та розуміння у суспільстві доцільності змін тощо. Однак миттєві зрушення в енергобалансі держави технологічно не є можливими. За даними Держкомстату України [23], основними джерелами генерації електричної енергії у 2018 р. є: атомна енергетика, вугілля та торф, природний газ та, меншою мірою, біопаливо та відходи. Стрімкий розвиток відновлювальної енергетики обумовлений політикою держави в даній галузі, що знайшла відображення зокрема у Енергетичній стратегії України на період до 2035 року, що прийнята урядом 18 серпня 2017 р., якою передбачено 25% відновлювальної енергетики в загальному первинному постачанні енергії до 2035 р. Необхідно звернути увагу, що показники генерації відновлювальних джерел електричної енергії, як правило, розглядаються разом із виробництвом гідроелектростанцій та біопалива.

Зважаючи на структуру енергобалансу об'єднаної енергосистеми України, екологічні ризики та перспективи розвитку вугільної галузі, воднева енергетика є перспективним балансозабезпечуючим фактором стабілізації енергосистеми.

Об'єднана енергетична система України – це складний комплекс електростанцій, електричних та теплових мереж. Всі елементи енергетичної системи узгоджені єдиним режимом роботи, що зумовлено необхідністю узгодження виробництва, передачі та розподілу енергії. Найбільш зручним та ефективним видом енергії для транспортування є електрична енергія. Переваги її товарного життєвого циклу: виробництва, передачі, розподілу та утилізації зумовлює її домінування у промисловому та побутовому секторах.

Однак в Україні не спостерігається і тенденція зростання енергоспоживання на основі відновлюваних джерел у 2017-2018 рр. У 2018 р. склало 93165 тис. т н. е. (табл. 1).

Енергоспоживання на основі відновлюваних джерел за 2007-2018 рр.

№ з/п		Одиниця виміру	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017 ²	2018 ³
1	Загальне постачання первинної енергії	тис. т н.е.	139330	134562	114420	132308	126438	122488	115940	105683	90090	94383	89462	93165
<i>із нього</i>														
2	Гідроенергетика	тис. т н.е.	872	990	1026	1131	941	901	1187	729	464	660	769	897
3	у % до підсумку	%	0,6	0,7	0,9	0,9	0,7	0,7	1,0	0,7	0,5	0,7	0,9	1,0
4	Енергія біопалива та відходи	тис. т н.е.	1508	1610	1433	1476	1563	1522	1875	1934	2102	2832	2989	3195
5	у % до підсумку	%	1,1	1,2	1,3	1,1	1,2	1,2	1,6	1,8	2,3	3,0	3,3	3,4
6	Вітрова та сонячна енергія	тис. т н.е.	4	4	4	4	10	53	104	134	134	124	149	197
7	у % до підсумку	%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2
Усього енергія від відновлювальних джерел														
8	Загальне постачання енергії від відновлювальних джерел	тис. т н.е.	2384	2604	2463	2611	2514	2476	3166	2797	2700	3616	3907	4289
9	Частка постачання енергії від відновлювальних джерел	%	1,7%	1,9	2,2	2,0	2,0	2,0	2,7	2,6	3,0	3,8	4,4	4,6

Енергомісткість промисловості має стабільну тенденцію та склало у 2020 р. 0,148 т н.е./тис. міжнародних доларів. Виникає потреба активізації дій уряду та бізнесу щодо розвитку водневої енергетики.

Використання водню як проміжного енергоносія для забезпечення збалансованого використання відновлюваних джерел енергії (вітрової та сонячної електроенергії) на всіх етапах може орієнтуватися на відповідні обсяги генерації.

Потенційно можливий обсяг виробництва «зеленого» водню в Україні розраховано Інститутом джерел відновлювальної енергії НАН України за результатами проведених наукових досліджень потенціалу генерації електроенергії вітро- та фотоелектричними станціями. Для розрахунку потенційно можливого обсягу виробництва «зеленого» водню за допомогою електролізу передбачено питоме споживання електроенергії 4,5 кВт·год/нм³ або 50,6 кВт·год на 1 кг водню (табл. 2).

Таблиця 2

Орієнтовний прогноз виробництва «зеленої» електроенергії та водню

		2025	2030	2035
Енергетична стратегія	млрд кВт·год	12	18	25
	H ₂ (млрд нм ³)	0,6	0,9	12
Дані ІВЕ	млрд кВт·год	21,6	35,5	52,6
	H ₂ (млрд нм ³)	1,1	1,8	2,6

Зазначені обсяги «зеленого» водню можуть застосуватися в енергетичній системі в якості акумулюючого енергоносія. Решта водню, отриманого в тому числі з відновлюваних джерел, може спрямовуватися для інших потреб.

Оскільки головною перешкодою для масштабного впровадження ВЕС та СЕС є перемінливий характер їхньої генерації, то на регулювання енергобалансу вони можуть спрямувати частину своєї потужності. Якщо балансування здійснюється шляхом акумулювання та повторного використання частини енергії, то

з урахуванням ККД процесу «електроенергія-електроліз-паливний елемент електроенергія» на рівні 40% та потреби спрямувати на балансування 10-15% перемінної енергії, пропорція генерації в мережу та потреб балансування має становити 3:1 (експертні дані).

Аналіз виробничої бази України здійснено шляхом використання даних, які стосуються різних аспектів водневих технологій, а саме: отримання водню, застосування водню, а також можливості його транспортування та приклади практичного застосування водневих установок. В Україні цирконієво-

керамічна паливна комірка на полегшеному металевому носії для енергетичних систем безпілотних літальних апаратів розроблялась низкою інститутів НАН України (Інститутом проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича, Інститутом загальної та неорганічної хімії ім. В. І. Вернадського, Інститутом біологічної хімії, Фізико-механічним інститутом ім. І. В. Карпенка, Інститутом фізичної хімії ім. М. В. Писаржевського), а також створено зразки низькотемпературних паливних комірок з мембрано-електролізним блоком на основі комерційної іон-провідної мембрани «Нафіон». В Інституті проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України розроблено технологію виготовлення новітніх мембрано-електродних блоків різних розмірів для низькотемпературних воднево-кисневих паливних елементів і батарей на основі протонпровідних мембран та вдосконалених катодних і анодних каталізаторів. На основі цієї технології на ПАО "ЕЛМІЗ" організовано виробництво демонстраційних наборів до курсу «Електрохімічна енергетика» у вищих навчальних закладах та середній школі. Ці набори демонструють сучасні технологічні принципи створення та роботи паливних елементів і можуть використовуватися для проведення дослідів і наукових експериментів. Співробітниками Інституту відновлюваної енергетики НАН України споруджено і введено в дію демонстраційну вітрову електростанцію ВЕУ-08, яка призначена для виробництва водню за допомогою електролізера. Основні елементи системи: вітроелектрична установка, блок керування, акумуляторні батареї, електролізер. В Інституті проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України розроблені електролізні комірки та електролізери з використанням активного газопоглинаючого електроду. В конструкції електролізера реалізується розроблена технологія розділення процесів виділення газів (водню та кисню) в часі, тобто процес роботи електролітичної системи стає циклічним – складається з періодів виділення водню та кисню, що чергуються. Розроблений 40 варіант електролізера забезпечує отримання водню та кисню при тиску 150 атм. без використання компресора. Для електрохімічного процесу генерації водню та кисню доцільно застосовувати просту конструкцію електролізерів водню високого тиску (ЕВТ), що дозволить виключити складнощі з його установкою та обслуговуванням у процесі експлуатації. Компонувачні схеми ЕВТ виконані на основі єдиної рами та умовно розділені на два основні відсіки: відсік електрохімічної генерації водню та кисню; відсік силової електроніки та управління. Для збільшення продуктивності ЕВТ необхідно відповідне збільшення кількості електрохімічних комірок, або підбір відповідного корпусу електрохімічної комірки. В Інституті проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України розроблені ЕВТ модульної конструкції, що забезпечують можливість отримання необхідної продуктивності шляхом об'єднання уніфікованих електролізних комірок: 1) ЕВТ 0,2-150, забезпечує продуктивність 0,2 м³ Н₂/год та 0,1 м³ О₂/год; 2) ЕВТ 0,5-150, забезпечує продуктивність 0,5 м³ Н₂/год та 0,25 м³ О₂/год; 3) ЕВТ 1,0-150, складається з двох комірок типу ЕВТ 0,5-150, що забезпечує продуктивність 0,5 м³ Н₂/год та 0,25 м³ О₂/год. Національний університет суднобудування (Миколаїв) розробив експериментальну сонячноводневу установку з виробництва водню з використанням електроенергії, отриманої з

сонячних фотоелектричних панелей. Установка призначена для зберігання отриманого водню, стиснення його за допомогою гідридного металевго компресора та заповнення композитних балонів для подальшого використання на електростанціях з паливними елементами. Продуктивність установки становить 10,0 кг Н₂ на добу, чистота водню 99,97%, тиск стиснення 60-80 МПа, режим роботи циклічний: вдень виробляється водень, вночі відбувається стиснення та наповнення балонів. Цей університет також розробив експериментальну установку для вилучення водню із газової суміші (синтетичного газу, супутніх та технологічних газів тощо) з використанням технології гідриду металу та його очищення. Продуктивність заводу становить 0,5-2,0 кг Н₂ на добу залежно від вмісту його в газовій суміші, чистота водню 99,97%, тиск подачі споживачеві 3,0-15,0 МПа. Режим роботи – безперервний. В даний час університет випробовує експериментальну установку для транспортування водню із застосуванням суспензії гідридоутворюючого матеріалу в органічній рідині. Рідка суспензія, насичена воднем до вмісту 1,0%, перекачується трубопроводами до споживача, де нагрівання виділяє водень під тиском 5,0... 15,0 МПа.

Висновок. Світові тенденції у енергетичній сфері націлені на декарбонізацію виробництва та застосування водню. Водень – універсальний енергоносіє, який може допомогти у вирішенні глобальних економічних проблем. Водень можна виробляти майже з усіх енергетичних ресурсів, хоча сьогоднішнє використання водню в нафтопереробці та хімічному виробництві переважно покривається воднем із вугілля. Водень може допомогти замінити різні види критичної енергії, допомогти у збереженні продукції відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна батарея та вітер.

Водень може сприяти декарбонізації цілого ряду секторів, включаючи транспортування, виробництва хімікатів та сталі, в яких важко скоротити викиди. Перехід до водневої енергетики може допомогти поліпшити якість повітря та зміцнити енергетичну безпеку України.

Список використаних джерел

1. Mahfuz M. H. et al. Exergetic analysis of a solar thermal power system with PCM storage. *Energy Convers Manage.* 2014. Vol. 78. P. 486–492. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.11.016>.
2. Ley M. B. et al. Complex hydrides for hydrogen storage – new perspectives. *Mater Today.* 2014. Vol. 17(3). P. 122–128. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2014.02.013>.
3. Stern A. G., Stern A. G. A new sustainable hydrogen clean energy paradigm. *International Journal of Hydrogen Energy.* 2018. Vol. 43. Issue 9. P. 4244–4255. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.12.180>.
4. Burhan M., Shahzad M. W., Choon N. K. Hydrogen at the Rooftop: compact CPV-hydrogen system to convert sunlight to hydrogen. *Applied Thermal Engineering.* 2018. Vol. 132. P. 154–164. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.12.094>.
5. Graetz J., Vajo J. J. Controlled hydrogen release from metastable hydrides. *Journal of Alloys and Compounds.* 2018. Vol. 743. P. 691–696. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.01.390>.

6. Ivancic T. M. et al. Discovery of a new Al species in hydrogen reactions of NaAlH₄. *The Journal of Physical Chemistry Letters*. 2010. Vol. 1(15). P. 2412–2416.
7. Thomas G. Overview of storage development DOE hydrogen program. *Annu Rev. California: San Ramon*, 2000. 14 p.
8. Ouyang L. Z. et al. Excellent hydrolysis performances of Mg₃RE hydrides. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2013. Vol. 38(7). P. 2973–2978. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.12.092>.
9. Han W., Liu D. N., Shi Y. W., Tang J. H., Li Y. F., Ren N. Q. Biohydrogen production from food waste hydrolysate using continuous mixed immobilized sludge reactors. *Bioresource Technology*. 2014. Vol. 180. P. 54–58. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.12.067>.
10. Han W., Fang J., Liu Z., Tang J. Techno-economic evaluation of a combined bioprocess for fermentative hydrogen production from food waste. *Bioresource Technology*. 2016. Vol. 202. P. 107–112. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.11.072>.
11. Han W. et al. Simultaneous dark fermentative hydrogen and ethanol production from waste bread in a mixed packed tank reactor. *Journal of cleaner production*. 2017. Vol. 141. P. 608–611.
12. Jain R. K., Jain A., Jain I. P. Effect of La-content on the hydrogenation properties of the Ce¹-"xLa"xNi³Cr² (x=0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1) alloys. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2012. Vol. 37(4). P. 3683–3688.
13. Biomass Explained: Landfill Gas and Biogas. (12 Nov. 2019). *U.S. Energy Information Administration*. URL: <https://www.eia.gov/energyexplained/biomass/landfill-gas-and-biogas.php>.
14. FAQ – Key Questions and Answers at a Glance. *Clean Energy Partnership*. URL: <https://cleanenergypartnership.de/en/faq-eng>.
15. Hydrogen Production: Electrolysis., *Office of Energy Efficiency & Renewable Energy*. URL: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-electrolysis>.
16. Hydrogen Production: Natural Gas reforming. *Office of Energy Efficiency & Renewable Energy*. URL: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-natural-gas-reforming>.
17. New Catalyst Efficiently Produces Hydrogen from Seawater. Holds promise for large-scale hydrogen production, desalination. *Sciencedaily*. 2019. 11 Nov. URL: <https://www.sciencedaily.com/releases/2019/11/191111801111.htm>.
18. Opportunities for Australia from Hydrogen Exports. Report for ARENA (Australian Renewable Energy Agency). Canberra: Acil Allen Consulting, 2018. URL: <https://arena.gov.au/assets/2018/08/opportunities-for-australia-from-hydrogen-exports.pdf>.
19. Green African Hydrogen: Operational Planning. Report. Zimbabwe: African Hydrogen Partnership, 2019.
20. Air Liquide Invests in the World's Largest Membrane-Based Electrolyzer to Develop Its CarbonFree Hydrogen Production. *Air Liquide*. 2019. News release, February 25. URL: <https://www.airliquide.com/group/press-releases-news/2019-02-25/air-liquide-invests-worlds-largest-membrane-based-electrolyzer-develop-its-carbon-free-hydrogen>.
21. Ajayi-Oyakhire Olu. Hydrogen – Untapped Energy? Derbyshire: Institution of Gas Engineers and Managers, 2012. URL: <https://www.h2knowledgecentre.com/content/policypaper1877>.
22. Attwood James. The Hyundai Nexa has become the first hydrogen fuel cell electric vehicle (FCEV) to score a maximum five-star Euro NCAP safety rating. *Autocar*. News release, 2018, October 24. URL: <https://www.autocar.co.uk/car-news/new-cars/hyundai-nexo-fuel-cell-suv-achieves-top-safety-rating>.
23. Babcock Stephane. Kenworth, Toyota Unveil Jointly Developed Hydrogen Fuel Cell Truck. *Heavy Duty Trucking news release*. 2019. April 22. URL: <https://www.truckinginfo.com/330270/toyota-and-kenworth-unveil-jointly-developed-hydrogen-fuel-cell-truck>.
24. Ballard Announces Planned Deployment of 500 Fuel Cell Commercial Trucks in Shanghai. *Ballard Power Systems*. 2018. URL: <https://www.ballard.com/about-ballard/newsroom/news-releases/2018/02/14/ballard-announces-planned-deployment-of-500-fuel-cell-commercial-trucks-in-shanghai>.
25. Recent Developments in Europe's Fuel Cell Bus Market. *Ballard Power Systems*. 2019. February 11. URL: <https://www.ballard.com/about-ballard/newsroom/market-updates/recent-developments-in-europe-s-fuel-cell-bus-market>.
26. Green Hydrogen in Developing Countries. ESMAP. 2020. Washington: World Bank.
27. Fraile Daniel, Jean-Christophe Lanoix, Patrick Maio, Azalea Rangel, and Angelica Torres. Overview of the Market Segmentation for Hydrogen Across Potential Customer Groups, Based on Key Application Areas. Report for the FCH JU. Brussels: CertifHy, 2015.
28. Якубовський М. М., Ляшенко В. І. Модернізація економіки промислових регіонів: спроба концептуалізації. *Вісник економічної науки України*. 2016. № 1 (30). С. 188–195.
29. Ляшенко В. І., Котов Є. В. Україна XXI: неоіндустріальна держава або «крах проекту»? монографія / НАН України, Ін-т економіки пром-сті; Полтавський ун-т економіки і торгівлі. Київ, 2015. 196 с.
30. Горбулін В. Мій шлях у задзеркалля. Не лише подорожні нотатки. Київ: Брайт Букс, 2019. 272 с.
31. Носовський А. В. Ядерна енергетика в контексті сталого розвитку. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2010. Вип. 2(46). С. 62–65.
32. Максимчук О. С. Пріоритетні напрями державного управління процесами розвитку ядерної енергетики та атомної промисловості в Україні. *Публічне адміністрування: теорія та практика*. 2013. Вип. 1. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Patp_2013_1_16 (дата звернення: 17 жовтня 2018 р.).
33. Мохонько Г. А., Тарасенко К. В. Проектний підхід в управлінні інноваційним розвитком підприємств атомної енергетики. *Економіка і суспільство*. 2018. Вип. 16. С. 417–424.
34. Мітяєва Т. Л. Поняття галузі та передумови її формування. *Економічна стратегія і перспективи розвитку сфери торгівлі та послуг*. 2013. Вип. 2(1). С. 199–209. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/esprstp_2013_2%281%29_30 (дата звернення: 17 жовтня 2018 р.).
35. Стратегія сталого розвитку України до 2030 року / Проект 2017. URL: <http://www.ua.undp.org/content/ukraine/uk/home/library/sustainable-development-report/Sustainable-Dev-Strategy-for-Ukraine-by-2030.html> (дата звернення: 16 жовтня 2018 р.).

36. Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність»: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 18 серпня 2017 р. № 605-р. URL: <https://www.kmu.gov.ua/ua/pras/250250456> (дата звернення: 16 жовтня 2018 р.).

37. Підприємства та компанії галузі / Офіційний сайт Міністерства енергетики та вугільної промисловості України. URL: http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/officialcategory?cat_id=24491606 (дата звернення: 17 жовтня 2018 р.).

38. Максимчук О. С. Напрямки забезпечення інноваційного розвитку підприємств сфери послуг. *Удосконалення механізму інноваційного розвитку суб'єктів національної економіки України*: колективна монографія / Т. В. Гринько, М. М. Кошевий, Г. Ю. Єлисеєва та ін.; за наук. ред. О. К. Єлисеєвої. Київ: Центр учбової літератури, 2013. С. 173–211.

39. Демьянюк В. АЕС — найпотужніший драйвер економіки. *Дзеркало тижня*. 2019. №50. С. 13.

40. IEA. Electricity Information: World energy balance. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/electricity-information>.

References

1. Mahfuz, M. H. et al. (2014). Exergetic analysis of a solar thermal power system with PCM storage. *Energy Convers Manage*, Vol. 78, pp. 486–492. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.11.016>.

2. Ley, M. B. et al. (2014). Complex hydrides for hydrogen storage — new perspectives. *Mater Today*, Vol. 17(3), pp. 122–128. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2014.02.013>.

3. Stern, A. G., Stern, A. G. (2018). A new sustainable hydrogen clean energy paradigm. *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 43, Issue 9, pp. 4244–4255. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.12.180>.

4. Burhan, M., Shahzad, M. W., Choon, N. K. (2018). Hydrogen at the Rooftop: compact CPV-hydrogen system to convert sunlight to hydrogen. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 132, pp. 154–164. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.12.094>.

5. Graetz, J., Vajo, J. J. (2018). Controlled hydrogen release from metastable hydrides. *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 743, pp. 691–696. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.01.390>.

6. Ivancic, T. M. et al. (2010). Discovery of a new Al species in hydrogen reactions of NaAlH₄. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, Vol. 1(15), pp. 2412–2416.

7. Thomas, G. (2000). Overview of storage development DOE hydrogen program. *Annu Rev. California, San Ramon*. 14 p.

8. Ouyang, L. Z. et al. (2013). Excellent hydrolysis performances of Mg₃RE hydrides. *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 38(7), pp. 2973–2978. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.12.092>.

9. Han, W., Liu, D. N., Shi, Y. W., Tang, J. H., Li, Y. F., Ren, N. Q. (2014). Biohydrogen production from food waste hydrolysate using continuous mixed immobilized sludge reactors. *Bioresource Technology*, Vol. 180, pp. 54–58. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.12.067>.

10. Han, W., Fang, J., Liu, Z., Tang, J. (2016). Techno-economic evaluation of a combined bioprocess for fermentative hydrogen production from food waste.

Bioresource Technology, Vol. 202, pp. 107–112. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.11.072>.

11. Han, W. et al. (2017). Simultaneous dark fermentative hydrogen and ethanol production from waste bread in a mixed packed tank reactor. *Journal of cleaner production*, Vol. 141, pp. 608–611.

12. Jain, R. K., Jain, A., Jain, I. P. (2012). Effect of La-content on the hydrogenation properties of the Ce¹-"xLa"xNi³Cr² (x=0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1) alloys. *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 37(4), pp. 3683–3688.

13. Biomass Explained: Landfill Gas and Biogas. (12 Nov. 2019). *U.S. Energy Information Administration*. Retrieved from <https://www.eia.gov/energyexplained/biomass/landfill-gas-and-biogas.php>.

14. FAQ — Key Questions and Answers at a Glance. *Clean Energy Partnership*. Retrieved from <https://cleanenergypartnership.de/en/faq-eng>.

15. Hydrogen Production: Electrolysis. *Office of Energy Efficiency & Renewable Energy*. Retrieved from <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-electrolysis>.

16. Hydrogen Production: Natural Gas reforming. *Office of Energy Efficiency & Renewable Energy*. Retrieved from <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-natural-gas-reforming>.

17. New Catalyst Efficiently Produces Hydrogen from Seawater. Holds promise for large-scale hydrogen production, desalination. (2019). *Sciencedaily*, 11 Nov. Retrieved from <https://www.sciencedaily.com/releases/2019/11/191111180111.htm>.

18. Opportunities for Australia from Hydrogen Exports. Report for ARENA (Australian Renewable Energy Agency). (2018). Canberra, Acil Allen Consulting. Retrieved from <https://arena.gov.au/assets/2018/08/opportunities-for-australia-from-hydrogen-exports.pdf>.

19. Green African Hydrogen: Operational Planning. Report. (2019). Zimbabwe, African Hydrogen Partnership.

20. Air Liquide Invests in the World's Largest Membrane-Based Electrolyzer to Develop Its CarbonFree Hydrogen Production. (2019). *Air Liquide*, News release, February 25. Retrieved from <https://www.airliquide.com/group/press-releases-news/2019-02-25/air-liquide-invests-worlds-largest-membrane-based-electrolyzer-develop-its-carbon-free-hydrogen>.

21. Ajayi-Oyakhire, Olu. (2012). Hydrogen — Untapped Energy? Derbyshire, Institution of Gas Engineers and Managers. Retrieved from <https://www.h2knowledgecentre.com/content/policypaper1877>.

22. Attwood, James. (2018). The Hyundai Nexa has become the first hydrogen fuel cell electric vehicle (FCEV) to score a maximum five-star Euro NCAP safety rating. *Autocar*. News release, October 24. Retrieved from <https://www.autocar.co.uk/car-news/new-cars/hyundai-nexo-fuel-cell-suv-achieves-top-safety-rating>.

23. Babcock, Stephane. (2019). Kenworth, Toyota Unveil Jointly Developed Hydrogen Fuel Cell Truck. *Heavy Duty Trucking news release*, April 22. Retrieved from <https://www.truckinginfo.com/330270/toyota-and-kenworth-unveil-jointly-developed-hydrogen-fuel-cell-truck>.

24. Ballard Announces Planned Deployment of 500 Fuel Cell Commercial Trucks in Shanghai. (2018). *Ballard Power Systems*. Retrieved from <https://www.ballard.com/about-ballard/newsroom/news-releases/2018/02/14/ballard-announces-planned-deployment-of-500-fuel-cell-commercial-trucks-in-shanghai>.

25. Recent Developments in Europe's Fuel Cell Bus Market. (2019). *Ballard Power Systems*, February 11. Retrieved from <https://www.ballard.com/about-ballard/newsroom/market-updates/recent-developments-in-europe-s-fuel-cell-bus-market>.
26. Green Hydrogen in Developing Countries. ESMAP. (2020). Washington: World Bank.
27. Fraile Daniel, Jean-Christophe Lanoix, Patrick Maio, Azalea Rangel, and Angelica Torres. (2015). Overview of the Market Segmentation for Hydrogen Across Potential Customer Groups, Based on Key Application Areas. Report for the FCH JU. Brussels, CertifHy.
28. Yakubovskiy, M. M., Liashenko, V. I. (2016). Modernizatsiia ekonomiky promyslovykh rehioniv: sprobа kontseptualizatsii [Modernization of the economy of industrial regions: an attempt at conceptualization]. *Visnyk ekonomichnoi nauky Ukrainy*, 1 (30), pp. 188-195 [in Ukrainian].
29. Liashenko, V. I., Kotov, Ye. V. (2015). Ukraina XXI: neoindustrialna derzhava abo «krakh proektu»? [Ukraine XXI: neoindustrial state or "project collapse"?]. Kyiv, IIE of NAS of Ukraine; Poltava University of Economics and Trade. 196 p. [in Ukrainian].
30. Horbulin, V. (2019). Mii shliakh u zadzerkallia. Ne lyshe podorozhni notatky [My way to the mirror. Not just travel notes]. Kyiv, Bright Books. 272 p. [in Ukrainian].
31. Nosovskyi, A. V. (2010). Yaderna enerhetyka v konteksti staloho rozvytku [Nuclear energy in the context of sustainable development]. *Yaderna ta radiatsiina bezpeka – Nuclear and radiation safety*, Issue 2(46), pp. 62-65 [in Ukrainian].
32. Maksymchuk, O. S. (2013). Priorytetni napriamy derzhavnogo upravlinnia protsesamy rozvytku yadernoi enerhetyky ta atomnoi promyslovosti v Ukraini [Priority directions of state management of processes of development of nuclear energy and nuclear industry in Ukraine]. *Publichne administruvannya: teoriia ta praktyka – Public administration: theory and practice*, Issue 1. Retrieved from http://nbuv.gov.ua/UJRN/Patp_2013_1_16 [in Ukrainian].
33. Mokhonko, H. A., Tarasenko, K. V. (2018). Proektnyi pidkhid v upravlinni innovatsiinym rozvytkom pidpriemstv atomnoi enerhetyky [Project approach in management of innovative development of nuclear power enterprises]. *Ekonomika i suspilstvo – Economy and society*, Issue 16, pp. 417–424 [in Ukrainian].
34. Mitiaieva, T. L. (2013). Poniattia haluzi ta peredumovy yii formuvannia [The concept of the industry and the prerequisites for its formation]. *Ekonomichna stratehiia i perspektyvy rozvytku sfery torhivli ta posluh – Economic strategy and prospects for trade and services*, Issue 2(1), pp. 199-209 [in Ukrainian].
35. Stratehiia staloho rozvytku Ukrainy do 2030 roku (Proekt) [Sustainable Development Strategy of Ukraine until 2030 (Project)]. (2017). Retrieved from <http://www.ua.undp.org/content/ukraine/uk/home/library/sustainable-development-report/Sustainable-Dev-Strategy-for-Ukraine-by-2030.html> [in Ukrainian].
36. Enerhetychna stratehiia Ukrainy na period do 2035 roku «Bezpeka, enerhoefektyvnist, konkurentospromozhnist»: Rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainyvid 18 serpnia 2017 r. # 605-r [Energy Strategy of Ukraine until 2035 "Security, Energy Efficiency, Competitiveness": Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine of August 18, 2017 № 605-r]. Retrieved from <https://www.kmu.gov.ua/ua/npas/250250456> [in Ukrainian].
37. Pidpriemstva ta kompanii haluzi [Enterprises and companies of the industry]. Official site of the Ministry of Energy and Coal Industry of Ukraine. Retrieved from http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/officialcategory?cat_id=24491606 [in Ukrainian].
38. Maksymchuk, O. S. (2013). Napriamky zabezpechennia innovatsiinoho rozvytku pidpriemstv sfery posluh [Directions for ensuring innovative development of enterprises in the service sector]. *Udoskonalennia mekhanizmu innovatsiinoho rozvytku subiektiv natsionalnoi ekonomiky Ukrainy [Improving the mechanism of innovative development of the subjects of the national economy of Ukraine]*. (pp. 173–211). Kyiv, Center for Educational Literature [in Ukrainian].
39. Demianiuk, V. (2019). AES — naipotuzhnishy draiver ekonomiky [NPP – the most powerful driver of the economy]. *Dzerkalo tyzhnia – Mirror of the week*, 50, pp. 13 [in Ukrainian].
40. IEA. Electricity Information: World energy balance. Retrieved from <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/electricity-information>.

Стаття надійшла до редакції 06.10.2021

Формат цитування:

Шевченко В. Г., Ляшенко В. І., Осадча Н. В. Світові тенденції розвитку водневої енергетики. *Вісник економічної науки України*. 2021. № 2 (41). С. 17-26. DOI: [https://doi.org/10.37405/1729-7206.2021.2\(41\).17-26](https://doi.org/10.37405/1729-7206.2021.2(41).17-26)
 Shevchenko, V. G., Lyashenko, V. I., Osadcha, N. V. (2021). World Trends in the Development of Hydrogen Energy. *Visnyk ekonomichnoi nauky Ukrainy*, 2 (41), pp. 17-26. DOI: [https://doi.org/10.37405/1729-7206.2021.2\(41\).17-26](https://doi.org/10.37405/1729-7206.2021.2(41).17-26)