

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Райчук Олександр Лернідович

УДК 621.359.4

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Перспективи використання водню як відновлюваного джерела енергії для
енергетики
(тема роботи)

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня бакалавр

кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Райчук О.Л.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Яковенко Віталій Адольфович

_(прізвище, ім'я, по батькові)

к.т.н., доцент кафедри електрифікації,
автоматизації виробництва та інженерної екології
(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2026

АНОТАЦІЯ

Райчук О.Л. Перспективи використання водню як відновлюваного джерела енергії для енергетики. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня бакалавра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – Поліський національний університет, Житомир, 2026.

Метою даної роботи є дослідження сучасного стану водневої енергетики та технологій її одержання.

Ціллю роботи є розглянути енергосистему, що має вітроелектричні установки, фотоелектричні перетворювачі, електролізер для виробництва водню, паливні елементи, для визначення ефективності акумулювання електричної енергії та водню.

Ключові слова: вітроелектричні установки, фотоелектричні перетворювачі, водень, електролізер, паливні елементи, акумулювання енергії, економічна ефективність.

ABSTRACT

Raychuk O.L. Prospects for the use of hydrogen as a renewable energy source for the energy industry. Qualification work for obtaining a bachelor's degree in specialty 141 - Electric power, electrical engineering and electromechanics - Polssia National University, Zhytomyr, 2026.

The purpose of this work is to study the current state of hydrogen energy and technologies for its production.

The purpose of the work is to consider an energy system that has wind power plants, photovoltaic converters, an electrolyzer for hydrogen production, fuel cells, to determine the efficiency of accumulating electrical energy and hydrogen.

Keywords: wind power plants, photovoltaic converters, hydrogen, electrolyzer, fuel cells, energy accumulation, economic efficiency.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1 ВОДЕНЬ ЯК ДЖЕРЕЛО ЕНЕРГІЇ	6
1.1 Особливості водневих технологій	6
1.2 Використання водню як джерела енергії	13
Висновки по розділу 1	18
РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ ОТРИМАННЯ ВОДНЮ ЗА ДОПОМОГОЮ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ	19
2.1 Сонячна теплова енергія.	19
2.2 Отримання водню за допомогою інших альтернативних джерел енергії	22
2.3 Розрахункова оцінка характеристик комбінованої енергоустановки.	25
Висновки по розділу 2	32
РОЗДІЛ 3 ОГЛЯД НОВИХ НАПРЯМКІВ В ОТРИМАННІ ВОДНЮ	33
3.1. Удосконалення методів електролізу води	33
3.2 Фотогальванічні процеси для одержання водню	34
Висновки по розділу 3	38
ВИСНОВКИ	39
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	40

ВСТУП

Дефіцит викопного органічного палива в поєднанні зі зростаючими глобальними екологічними проблемами зумовив величезний інтерес дослідників до використання відновлюваних джерел енергії.

Стратегія використання відновлюваних джерел енергії з воднем як енергоносієм передбачає значну зміну існуючої структури паливно-енергетичного комплексу. Основний шлях цієї програми пов'язаний з поступовою заміною вуглеводневих енергоносіїв (нафта, природний газ, вугілля та продукти їх переробки) на водень, одержуваний шляхом розщеплення води з використанням як ряду традиційних (гідро- та атомна енергетика), так і відновлюваних (сонячні, вітрові, геотермальні і т. п.) джерел первинної енергії. Нова інфраструктура, формування якої планується завершити до кінця нинішнього століття, передбачає використання водню та електроенергії як основних взаємодоповнюючих компонентів енергетичної складової економіки, включаючи енергетику, промисловість, транспорт, сільське господарство та комунально-побутову сферу.

В даний час роботи в області водневих енерготехнологій знаходяться в стадії істотного зростання, що так чи інакше проявляється у всіх сферах техногенної та суспільної діяльності суспільства. Ця тенденція характерна для більшості країн світу, включаючи розвинені (США і Канада, Японія, Західна Європа), країни, що розвиваються (Китай, Індія) та багато інших. Починаючи з початку століття, зазначений процес торкнувся і України, де роботи з водневої енергетики та паливних елементів зведено в ранг пріоритетних і отримують інвестиційну підтримку і держави, і великих комерційних структур.

В даній роботі міститься короткий аналіз сучасного стану і тенденцій розвитку робіт в області водневої енергетики і технології і має на меті показати актуальність даного напрямку, деякі проблеми подальшого розвитку цієї області, а також необхідність прийняття рішень, що забезпечують ефективне планування, координацію та фінансування відповідних робіт.

Для успішної реалізації концепції водневих енергосистем необхідно мати достатньо чітке уявлення про загальні тенденції розвитку та виробити системний підхід до вирішення проблеми. і яка має на меті виробити такий системний підхід.

Відповідно до вище зазначеного **метою даної роботи** є дослідження сучасного стану водневої енергетики та технологій її одержання.

Ціллю роботи - розглянути енергосистему, що має вітроелектричні установки, фотоелектричні перетворювачі, електролізер для виробництва водню, паливні елементи, для визначення ефективності акумулювання електричної енергії та водню.

Методи дослідження. На основі математичного моделювання обрано оптимальну структуру енергосистеми та досліджено в динаміці режими роботи джерел та накопичувачів енергії.

Перелік публікацій автора за темою дослідження:

Райчук О. Л. ВИКОРИСТАННЯ ВОДНЮ ЯК ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ Матеріали науково-практичної конференції факультету інженерії та енергетики «НАУКОВІ ЧИТАННЯ за підсумками І-го туру Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей» 29 квітня 2026 року. Житомир: Поліський національний університет, 2026.- С 195-198.

Райчук О. Л., Древіцький С. В. ПРИЧИНИ ЗРОСТАННЯ ІНТЕРЕСУ ДО ВОДНЕВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ Матеріали науково-практичної конференції факультету інженерії та енергетики «НАУКОВІ ЧИТАННЯ за підсумками І-го туру Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей» 29 квітня 2026 року. Житомир: Поліський національний університет, 2026.- С 195-198.

РОЗДІЛ 1

ВОДЕНЬ ЯК ДЖЕРЕЛО ЕНЕРГІЇ

1.1 Особливості водневих технологій

Водень має унікальний набір властивостей, які, з одного боку, визначають можливості його широкого використання в різних галузях промисловості, а з іншого - породжують ряд технічних проблем, що потребують вирішення в ході реалізації того чи іншого технологічного процесу з використанням водню [3–6].

Водень є найпоширенішим елементом у Всесвіті (93 ат. %) і одним з найпоширеніших на Землі (15,52 ат. %). При середньому вмісті водню в земній корі 1,4 г/кг його основними джерелами на Землі є вода та органічні сполуки, включно з кам'яним вугіллям, нафтою, природним газом і біомасою.

Водень здатний вступати у присутності каталізаторів при підвищених температур у реакції гідрування які широко використовується в хімічній промисловості для синтезу аміаку та метанолу, нафтохімічній – пригідрокрекінгу, а також в харчовій - для гідрування рослинних жирів, а також у ряді інших галузей. Відновні властивості водню по можливості відновлення оксидів, галогенідів та інших сполук до елементів, використовуються в порошковій металургії, в різних хімічних технологіях, а також в металообробці, машинобудуванні та мікроелектроніці.

Водень на відміну від інших відомих газів має дуже малу в'язкість і високу теплопровідність. Так, за кімнатної температури та атмосферного тиску водень має теплопровідність (0,182 Вт/(м·К)) [24] у 1,24 раза більша теплопровідності гелію, у 5,9 – метану, у 7,2 – азоту та кисню, у 10,7 – аргону. Коефіцієнт динамічної в'язкості газоподібного водню за атмосферного тиску та кімнатної температури становить $8,92 \cdot 10^{-6}$ Па·с, що в 2,11 раза нижче, ніж для гелію за тих самих умов [25]. Завдяки цій обставині водень ефективно застосовується для зменшення тертя в рухомих частинах установок (наприклад, турбогенераторів, що використовуються в тепловій та атомній енергетиці) та їх охолодження. Водночас низька в'язкість водню зумовлює

підвищену ймовірність його витоків через ущільнення, висуваючи більш жорсткі вимоги до якості водневої газової арматури.

Водень відносять до горючих газів з підвищеною пожежовибухонебезпекою [8]. Цьому сприяють широкі концентраційні межі горіння і детонації, висока швидкість розповсюдження полум'я (у 8 разів вища, ніж у метану), а також низька (в 14,5 разів нижча, ніж у метану) мінімальна енергія займання. Разом з тим, низька щільність і висока дифузійна здатність водню сприяють швидкому зниженню його концентрації на відкритій місцевості та у вентильованих приміщеннях. До того ж, водень має досить високу нижню межу детонації (в 2,06 рази вищу, ніж у метану), що суттєво знижує його вибухонебезпечність в реальних умовах.

На сьогоднішній час технології великомасштабного виробництва і переробки водню є добре освоєними. Відповідно до даних джерел [9–13], щорічне світове виробництво водню до кінця 1990-х рр. становило 40–45 млн. т або 450–500 млрд. м³. В інших джерелах [6] наводяться дещо більші значення: 60 млн. т на 1990 і 80 млн. т на 2018 р. У будь-якому випадку, вказані обсяги є значними, відповідаючи 20–25 % щорічного світового видобутку природного газу. Найбільшу кількість водню отримують шляхом парової конверсії або часткового окислення, головним чином, природного газу (рис. 1а). Слід відмітити, що тільки 62 % водню виробляють в якості цільового продукту, решта 38 % є побічним продуктом інших виробництв (нафтопереробка, коксохімія і т. п.). До останніх також відноситься майже весь водень, що отримується в даний час електролізом (виробництво хлору і каустичної соди).

На рис. 1.1 зображено структуру використання водню [6, 24]. З рисунка видно, що основними споживачами водню (95 %) являється хімічна промисловість та нафтопереробка. Водень також основним елементом при виробництві мінеральних добрив (отримання аміаку). Водень має широке використання в численних процесах органічного синтезу як у вигляді метанолу, так і безпосереднього реагенту. Особливе місце водень займає в

нафтопереробці (гідрокрекінг, гідроочищення), сприяючи збільшенню глибини переробки сирової нафти та підвищенню якості кінцевих продуктів — вуглеводневих палив з підвищеною теплотворною здатністю та зменшеними шкідливими викидами від їх спалювання. Потреба нафтопереробки у водні на 2019 рік становила близько 1 мас. % від об'єму перероблюваної сирової нафти, причому має місце тенденція неухильного збільшення вказаної частки [24].

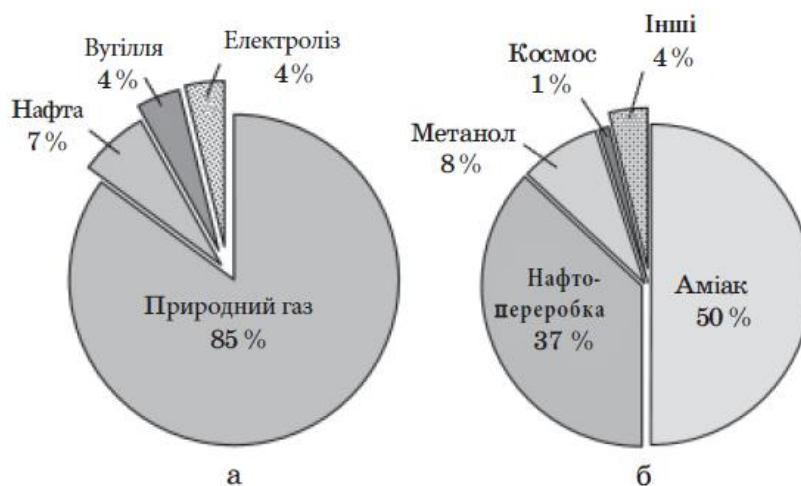


Рисунок 1.1. Структура світового виробництва (а) та споживання (б) водню

Більше половини споживаного у світі водню на сьогоднішній день використовується як хімічна сировина. Непряме використання решти в енергетичних цілях головним чином стосується забезпечення нагріву для проведення технологічних процесів, як правило, з одночасною участю водню в хімічних реакціях (гідрування, розкислення тощо). Водень як розкислювач широко застосовують у порошковій металургії, металообробці, виробництві скла, синтетичних рубінів і т. п., що складає приблизно 2 % від загального споживання водню. Застосування водню в мікроелектроніці головним чином пов'язане з отриманням кремнію шляхом відновлення SiCl_4 .

Основним споживачем водню як палива є космонавтика. Комбінація «рідкий водень (паливо) - рідкий кисень (окислювач)» забезпечує максимальне виділення енергії на одиницю ваги, що є визначальним критерієм для аерокосмічних застосувань. Слід зазначити, що зі значного обсягу виробленого водню лише 5 % на даний час є комерційним продуктом, який

продається від виробників споживачам. Як правило, великі споживачі водню самі виробляють його для власних потреб [3, 5], що зумовлено економічними факторами (високі ціни на товарний водень), а також технічними труднощами забезпечення зберігання і транспортування великих кількостей водню. Удосконалення водневих технологій пов'язане з вирішенням трьох груп проблем, пов'язаних з розробкою ефективних, економічно вигідних і безпечних процесів і обладнання, що забезпечують виробництво водню, його використання, а також — компактне зберігання. Відповідно, роботи в області водневих технологій розвиваються переважно за трьома напрямками: виробництво водню, зберігання та транспортування водню, використання водню.

Існуючі способи виробництва водню базуються на використанні як вихідної сировини води (електроліз, фотоліз і радіоліз), вугілля та природного газу (парова та парокиснева конверсії), сірководню (хімічне та плазмохімічне розкладання) і деяких інших водневмісних речовин. Основними напрямком удосконалення всіх процесів виробництва водню є збільшення їх ефективності, зменшення капітальних витрат та експлуатаційних витрат, збільшення надійності та технологічної гнучкості. Отримання водню з природних органічних палив наразі є найбільш широко освоєним методом. Основною технологією є парова конверсія метану [13, 15–17]. Як видно з даних рис. 1.1а, за вказаною технологією отримують близько 85 % виробленого у світі водню, що обумовлено достатньо високою (понад 80 %) ефективністю процесу, його реалізацією на рівні великомасштабного виробництва, порівняно невисокою (на даний момент) вартістю та налагодженою інфраструктурою транспортування вихідної сировини. В результаті вартість водню для даної технології виявляється найнижчою у порівнянні з вартістю водню, отриманого іншими методами. При цьому вона суттєво знижується по мірі збільшення продуктивності (рис. 1.2): від 11,2 дол. США за 1 ГДж (1,3 дол. США/кг H_2) для порівняно малих промислових

установок (270 тис. м H_2 за день) до 5,5 дол. США за 1 ГДж (0,66 дол. США/кг H_2) для великих (7-25 млн. м³ H_2 за добу).

Основними недоліками отримання водню з природного газу є залежність від постачання сировини, основні запаси якої розподілені лише між кількома регіонами світу, а також викиди в атмосферу більших обсягів CO_2 , утилізація якого потребує значних капітальних витрат і експлуатаційних витрат, тим самим суттєво підвищуючи вартість кінцевого продукту. Крім цього, будучи ідеальним для великомасштабного виробництва, метод парової конверсії метану погано адаптується до установок малої продуктивності, необхідних для децентралізованого виробництва водню (наприклад, заправних станцій, автономних енергосистем і т. п.). Ще одним недоліком методу є наявність у кінцевому продукті домішок CO і CO_2 , що висуває додаткові вимоги до очищення водню при його використанні в ряді пристроїв (наприклад, у паливних елементах з водно-лужним або твердим полімерним електролітом).

З цих причин конверсія метану зазвичай розглядається як перехідна технологія від сформованої інфраструктури енергоринку до водневої економіки майбутнього. У далекій перспективі ця технологія, мабуть, буде витіснятися іншими. Сказане також відноситься до родинних технологій виробництва водню з інших органічних палив (парова конверсія вугілля, крекінг нафтопродуктів, піроліз біомаси і т. п.).

Слід зазначити, що з точки зору екології стратегія виробництва водневого палива з викопних вуглеводнів мало чим відрізняється від безпосереднього спалювання природних палив. Якщо в останньому випадку шкідливі викиди в атмосферу з'являються на стадії використання палива, то в першому ми маємо практично ті ж викиди на стадії його отримання. Тому основними компонентами нових технологій виробництва водню з органіки включають уловлювання супутніх викидів в атмосферу, в тому числі CO_2 . Як приклад можна навести останні розробки з парової конверсії вугілля [18]. Крім цього, важливим непрямим фактором тут є підвищення ефективності використання палива, що призводить до менших викидів в атмосферу при тому ж обсязі

кінцевого споживання енергії, оскільки водневі енерготехнології мають в цьому відношенні більший потенціал, ніж спалювання викопного палива.

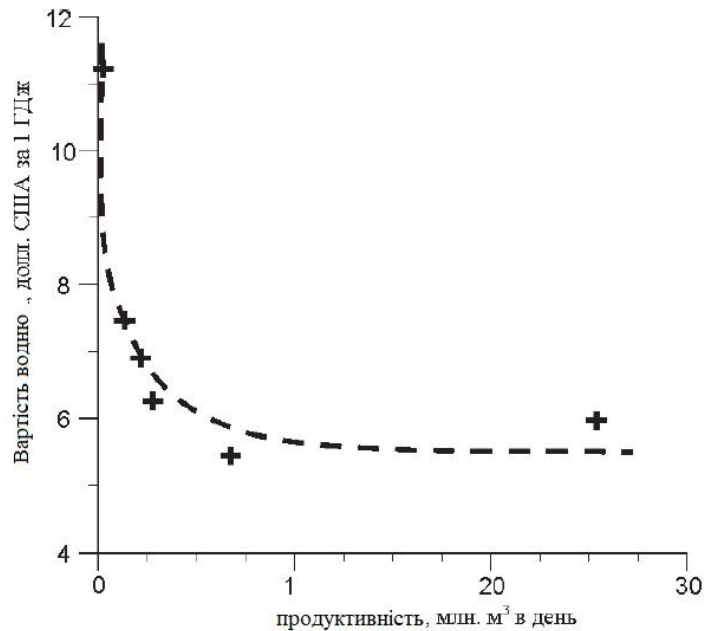


Рисунок 1.2. Собівартість виробництва водню (станом на 2019 рік, в енергетичному еквіваленті) за технологією парової конверсії природного газу

Електроліз води є найбільш перспективною технологією отримання водню в майбутньому, хоча в даний час через високу вартість частка цього методу в світовому виробництві водню не перевищує 5 % (рис. 1а). Найбільш привабливими особливостями електролізної технології є екологічна чистота (зрозуміло, за умови, що виробництво первинної енергії не пов'язане із забрудненням навколишнього середовища), можливість створення установок з широким діапазоном продуктивності (від декількох літрів до сотень м³ водню на годину), простота експлуатації та зручність в роботі, висока чистота виробленого водню і наявність цінного побічного продукту - газоподібного кисню.

В даний час існують три способи реалізації електролізної технології виробництва водню [16-21], які відрізняються типом використовуваного електроліту та умовами проведення електролізу (табл. 1.1).

Незалежно від способу реалізації, основний внесок у вартість водню, виробленого методом електролізу (70—90 %, див. табл. 1.2), вносять затрати на електроенергію.

Таблиця 1.1 - Способи реалізації електролізної технології виробництва водню

Типи електролізерів Електроліт	Температура електроліза, °C	Енерго-затрати на виробництво 1 м³ H₂, кВт·г	Особливості	Виробники
<u>Водно-лужні</u> КОН (NaOH), 20–30% водний розчин	50–100	4–6	Продуктивність до 500 м³/год H₂ (P=1–50 атм). Допустимий рівень навантаження від 20 до 100 % від номінальної продуктивності.	Stuart IMET; The Electrolyser Corporation Ltd. (Канада); Norsk Hydro (Норвегія); DeNora (Італія); та ін.
<u>С твердим полімерним електролітом (ТПЕ)</u> Іонообмінна мембрана з протонною провідністю	80–100	4–6	Продуктивність до 100 м³/год H₂ (P=1–150 атм). Малі габарити, безпечність, можливість роботи в нестационарних режимах, простота обслуговування, відсутність корозійно-активних речовин. ТПЕ електролізери в 5–7 разів дорожчі за водно-лужні з аналогічними характеристиками. Характеризуються жорсткими вимогами до чистоти води, що подається.	Proton Energy Systems, Inc. (Канада); Hamilton Substandard (США); H-Tec (Германія);
<u>З твердим оксидним електролітом</u> Цирконій-ітрієва кераміка з киснево-аніонною провідністю при високих температурах	800–1000	3.5–4	Може працювати лише в стаціонарному режимі; принаймні, під час експлуатації слід уникати численних циклів «пуск/зупинка», пов'язаних із циклічними змінами температури робочих елементів.	Експериментальні та дослідно-промислові зразки. Перспективні для отримання електроенергії у великих стаціонарних установках.

Отже, на відміну від розглянутого методу отримання водню з природного газу, при збільшенні продуктивності електролізної установки ціна водню суттєво не знижуватиметься, і основним фактором, що визначатиме конкурентоспроможність електролізера, буде не вартість, а ефективність його роботи (ККД). Водночас, за наявності дешевої електроенергії (наприклад, у «провальні» періоди її споживання) електролітичне виробництво водню може стати рентабельним.

Таблиця 1.2 – Ціна водню який виробляється методом електроліза

Ціна електроенергії дол. США/кВт·г	Ціна водню, дол США/кг
0,02	1,34–1,75
0,04	2,56–2,97
0,08	5,51–6,05

Інші методи виробництва водню наразі перебувають на стадії технологічних розробок. До них, зокрема, належать:

- розщеплення води на основі термохімічних циклів з використанням в якості первинної енергії теплоти ($T \sim 800$ оС), що надходить від ядерних реакторів або геліоустановок.;
- біохімічне розщеплення води (фотосинтез) з використанням спеціально виведених типів водоростей і мікроорганізмів [23];
- фотокаталітичне розщеплення води на основі напівпровідникових матеріалів (змішані оксиди, сульфіді і селеніді, нітриди і оксинітриди) [24];
- виробництво енергоакумулюючих речовин (сплави кремнію та алюмінію) з подальшою генерацією з них водню шляхом гідролізу на місці споживання [6, 25]. Компактне і безпечне зберігання водню є дуже важливою проблемою, від успішного вирішення якої залежить кінцевий успіх реалізації концепції водневої енергетики і технології в цілому.

1.2 Використання водню як джерела енергії

Використання водню як палива ґрунтується на реакції окиснення водню киснем, яка має великий тепловий ефект ($120,6$ МДж/кг $H_2 = 33,5$ кВт·год/кг $H_2 = 3$ кВт·год/м³ водню). При отриманні водню електролізом води та к.к.д. електролізної установки 60—75 % фактичні енерговитрати на отримання 1 м³ водню становлять 4—5 кВт·год/м³ H_2 . При спалюванні 1 м³ водню в енергоустановці з ККД 15—20 % може бути отримано 0,45—0,6 кВт·год корисної роботи, а при використанні паливного елемента з ККД 40—60 % — 1,2—1,8 кВт·год. Таким чином, сумарний ККД водневого енергетичного циклу (при кінцевому виробленні механічної роботи або електроенергії) становить 10—15 % при використанні теплових машин та 24—45 % при електрохімічній утилізації водню. В енергоустановках, що використовують спалювання водню (двигуни внутрішнього згоряння, парогенератори, реактивні двигуни і т. п.), його переваги включають високу теплотворну здатність, повноту згоряння практично у всьому діапазоні співвідношень паливо/окислювач, високу

температуру полум'я, високий тепловий ККД (для двигунів внутрішнього згоряння — на 30—50 % вище, ніж при роботі на бензині), а також відсутність шкідливих викидів в атмосферу. В даний час водень широко використовується як ракетне паливо. Розробки автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння, що працюють на водні або суміші водню з традиційним паливом, на даний час реалізовані цілим рядом автомобільних компаній на рівні демонстраційних зразків; деякі в найближчий час плануються до серійного виробництва. Також виконано ряд успішних розробок воднево-кисневих парогенераторів, призначених для вироблення електрики в періоди пікового навантаження в складі турбогенераторних енергоустановок, а також для ряду інших цілей [4, 28]. Крім спалювання, водень може бути конвертований в різні форми енергії (теплову, електричну, хімічну) багатьма іншими способами: каталітичним горінням, електрохімічним перетворенням, гідрогенізацією та ін. Ефективність вказаних процесів для водню вища, ніж для інших видів палива. Тому розробці перспективних технологій на їх основі приділяється підвищена увага.

Основним напрямом сучасних розробок з використання водню в енергетичних цілях є електрохімічні генератори енергії — паливні елементи (ПЕ) [4, 16, 27, 28 та ін.]. У ПЕ здійснюється подача палива та окислювача на розділені електролітом електроди, в результаті чого процес окиснення реалізується електрохімічно з виробленням електроенергії.

Ідея використання водню як палива привела до появи паливних елементів, схожих на електрохімічні пристрої, що працюють на принципах гальванічного елемента, але відрізняються тим, що речовини для електрохімічної реакції не містяться всередині, а подаються ззовні [8, 14].

На рис.1.3 представлено схему роботи паливного елемента. Як видно з рис. 1.3, паливо (водень) і окисник (кисень) подаються на електроди, розділені електролітом, водень не згорає, а окислюється з утворенням води, в результаті чого виділяється енергія.

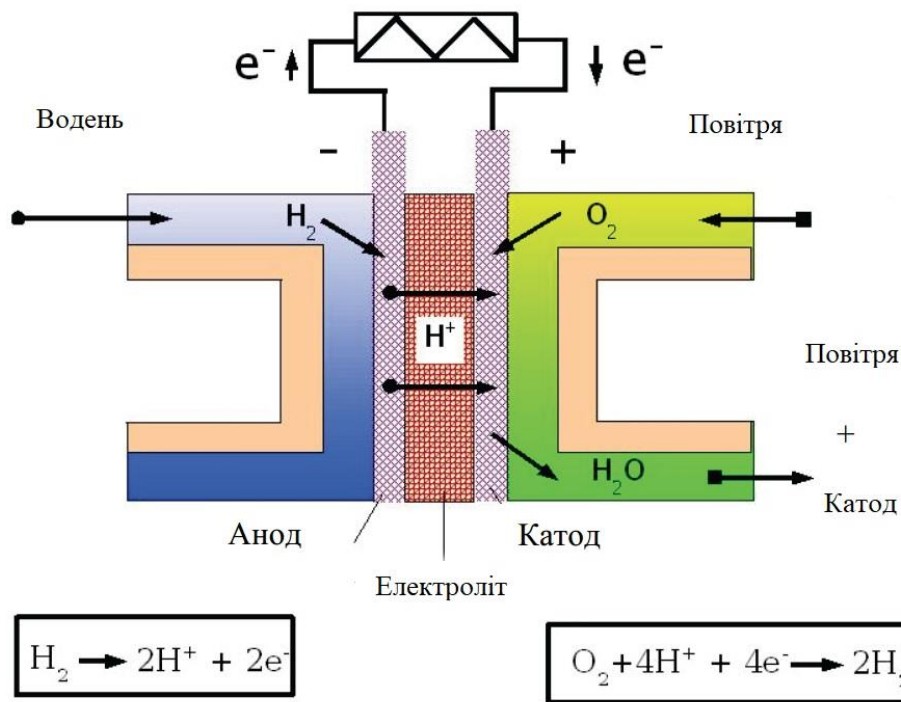


Рисунок 1.3. Принцип роботи паливного елемента

Оскільки в паливному елементі хімічна енергія напряму перетворюється на електричну, міняючи фазу теплової енергії, коефіцієнт корисної дії паливних елементів може досягати 90%.

У порівнянні з гальванічним елементом, що має обмежений термін служби, пов'язаний з кількістю реагуючих речовин, у паливному елементі реакція може тривати так довго, як довго надходять всередину паливо і окисник. Саме паливо зберігається в спеціальних ємностях або картриджах, які можуть бути змінними або заправлятися на спеціальних заправних станціях. Тепер, що стосується подібних паливних елементів, то вони вже застосовуються в самих різних сферах.

Залежно від типу використовуваного електроліту, існують ПЕ наступних типів:

- лужні ПЕ (відповідно до англійської літератури застосовується абревіатура AFC), які використовують 35–50 %-ний водний розчин лугу (KOH або NaOH) в якості електроліту. Вони експлуатуються при температурі до 100...120 °C (ПЕ на концентрованих, до 85 %-них, розчинах лугу використовуються при температурах до 250 °C). ПЕ даного типу є найбільш

розробленими, зокрема, вони широко застосовуються в автономних енергосистемах, що використовуються в космонавтиці та військово-морському флоті. Їх основним недоліком є неприпустимість наявності CO_2 як у паливі, так і в окислювачі;

- у ПЕ з електролітом на основі полімерної іонообмінної мембрани з протонною провідністю (PEMFC) мембрана являє собою тонку плівку на основі фторованих кислотних полімерів (типовий представник - нафіон) з нанесеним з обох боків електрокаталізатором (метали платинової групи). Робоча температура ПЕ даних типів становить 60...80 °C. Хоча використання таких ПЕ допускає наявність CO_2 у паливі або окислювачі (це, зокрема, зумовлює можливість їх тривалої роботи з використанням як окислювача атмосферного повітря), присутність інших домішок (оксид вуглецю, сполуки сірки) є небажаною. Крім цього, паливо / окислювач, що подаються, повинні бути зволженими, оскільки висихання мембрани призводить до її виходу з ладу. Так само, як і ТВЕ електролізери, дані ПЕ є досить дорогими. Разом з тим, малі габарити та зручність використання зумовлюють пріоритет розробок у цьому напрямку для створення дрібно- і середньомасштабних автономних енергоустановок (зокрема, для водневого транспорту);

- ПЕ з фосфорнокислотним електролітом (ФКПЕ) використовують в якості електроліту концентровану (~100 %) фосфорну кислоту, якою просякнута несуча матриця на основі карбіду кремнію. Вони працюють в діапазоні температур 150...220 °C. В даний час вони витісняються ПЕ інших типів, що переважають їх за експлуатаційними характеристиками, ефективністю та економічністю;

- ПЕ з електролітичною частиною на основі розплавів карбонатів (РКТЕ) представляє собою керамічну матрицю (LiAlO_2), просочену розплавом суміші карбонатів лужних металів (літію, натрію, калію). ПЕ даного типу працюють при 600...700 °C, не требуючи для своєї роботи застосування електрокаталізаторів. За своїми характеристиками даний вид ПЕ аналогічний фосфорнокислим. В силу потенційної дешевизни його планують

застосовувати в майбутньому для створення стаціонарних енергоустановок, поряд з розглянутими нижче ПЕ на основі твердооксидних електролітів;

- твердооксидні ТЕ (ТОПЕ) використовують в якості електроліту кераміку на основі оксиду цирконію, модифікованого добавками оксиду ітрію. Даний вид ПЕ працює при 900...1000 °С і є найбільш перспективним для роботи в складі великих стаціонарних енергоустановок. Високотемпературні ТЕ (РКТЕ і ТОТЕ) використовують в якості окислювача атмосферне повітря і в якості палива - водень, метан і багато інших палив, являючись вкрай невибагливими до їх якості. Основним недоліком даних видів ПЕ, так само як і електролізерів з твердооксидним електролітом, є небажаність частих пусків/зупинок, пов'язаних з розігрівом до робочої та охолодженням до кімнатної температур.

Якщо до кінця 1990-х років в світі налічувалось близько 100 (включаючи військові примінення) демонстраційних енергоустановок на паливних елементах [14], то до теперішнього часу інтенсивність розробок в даному напрямку різко зросла. ПЕ різних типів в даний час випускаються промисловістю дрібними і середніми серіями, включаючи досить великі (1 МВт) енергоустановки на ТОПЕ, що серійно випускаються фірмою Westinghouse, мобільні енергоустановки на ПЕМТЕ для водневого автотранспорту (Ballard Technologies) і цілий ряд інших.

Основними пріоритетами нових розробок в області ПЕ є підвищення їх ресурсу роботи і ККД, а також зниження вартості. В табл. 1.3 наведені вартісні показники для різних типів ПЕ на 2019 р. і прогноз на середину нинішнього століття [16].

Таблиця 1.3 - Вартість енергоустановок на паливних елементах

	Доларів США за 1 кВт встановленої потужності					
	AFC	PEMFC стаціонарні	PEMFC транспортні	PAFC	MCFC	SOFC
2019	2000	8000	550	3000	5000	10000
Перспектива	50–100	300	30	1000	600	600

Що стосується непаливних застосувань водню, то вони були коротко розглянуті на початку цього розділу. Відзначимо, що крім традиційних

виробництв, які використовують водень (виробництво аміаку, нафтопереробка, виробництво метанолу, олійно-жирова промисловість), великі перспективи розвитку мають галузі, пов'язані з водневою обробкою матеріалів. Даний напрямок має великий потенціал, зокрема - можливість створення нових високоефективних технологічних процесів (наприклад, отримання чистих металів шляхом прямого відновлення воднем вихідної сировини, отриманої з хімічно перероблених руд). Іншим перспективним напрямком є розробка нових технологій на основі використання металогідридів [26].

Висновки по першому розділу

Крім традиційних виробництв, які використовують водень (виробництво аміаку, нафтопереробка, виробництво метанолу, олійно-жирова промисловість), великі перспективи розвитку мають галузі, пов'язані з водневою обробкою матеріалів. Даний напрямок має великий потенціал, зокрема - можливість створення нових високоефективних технологічних процесів (наприклад, отримання чистих металів шляхом прямого відновлення воднем вихідної сировини, отриманої з хімічно перероблених руд).

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ ОТРИМАННЯ ВОДНЮ ЗА ДОПОМОГОЮ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

Отримання водню з природних джерел потребує значних енерговитрат, отже, водень слід розглядати як вторинний (проміжний) енергоносіє, що використовується для накопичення енергії від первинного джерела та її розподілу споживачам.

Найбільш перспективною сировиною для виробництва водню є вода, ресурси якої на Землі невичерпні. З іншого боку, продуктом використання водню в енергосистемах шляхом окислення також є вода. Таким чином, застосування водню як енергоносія (звісно, за умови екологічно чистого виробництва первинної енергії) забезпечує замкнутий екологічний цикл. Елементи енерготехнологічного ланцюга, включаючи виробництво водню з води, його зберігання та транспортування, а також кінцеве використання, не чинять жодного шкідливого впливу на навколишнє середовище. Вони також не пов'язані з викидами парникових газів (CO_2 та ін.).

2.1 Сонячна теплова енергія.

Вода розкладається на водень і кисень при температурі 2730°C . Досягти цієї температури можна за допомогою параболічного відбивача або лінзи, яка фокусує сонячні промені. За словами Роя Макалістера, президента американської Водневої Асоціації, $31\,000\text{ км}^2$ в сонячному кліматі може забезпечити достатньо сонячного світла для забезпечення енергією всіх США. Однак кількість води, необхідна щороку, дорівнювала б об'єму озера Мід позаду Дамби Гувера. Морської води було б достатньо. При спалюванні однієї тонни водню виробляється 9 тонн води. 50 % сонячного світла знаходяться у високотемпературному інфрачервоному спектрі. Тепловий розклад води здається найпростішим методом створення водню з води.

Джон Еріксон розробляв так звані «двигуни сонця» у 1880-х рр. Тисячі таких двигунів були продані, щоб качати воду, поки вони не були замінені електричними двигунами та механічною енергією.

Параболічну тарілку можна легко і дешево виготовити. Сонячне випромінювання зосереджено в точці, що розташовується вище центру тарілки. Її називають «точкою фокусування» сонячного концентратора. Тарілка зроблена з термостійкого матеріалу. Нагрівається циркулююча рідина, яка повертає турбіну для виробництва електроенергії. Чим більший діаметр тарілки, тим більша кількість виробленої енергії.

Проект сонячного концентратора, що складається з параболічної тарілки, парової турбіни (двигуна Стірлінга) та електрогенератора успішно реалізовано в США.

Параболічний концентратор діаметром 3 метри виробляє 4–5 кВт; 6,4 метра - 25–30 кВт. ККД таких установок 28–30 %. У штаті Аризона влітку можна отримати за допомогою таких установок 1,2 кВт·год/м²; взимку — 0,62 кВт·год/м². Експлуатаційні витрати - 5,00 дол./кВт.

Згідно з Полом Клаймасом з Лабораторії Sandia, це - «доведений, і ефективний спосіб виробництва сонячної електроенергії, розроблений спеціально для промисловості, з технічною та фінансовою підтримкою Sandia...»

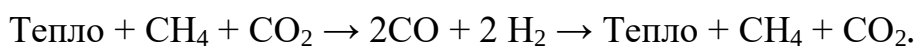
За допомогою сонячних концентраторів можна забезпечувати необхідним теплом термохімічні цикли та інші високотемпературні методи отримання водню. Теоретично сонячний концентратор дозволяє здійснювати пряме термічне розкладання води - термоліз.

Корпорація Макдоннелл Дугласа будувала «концентратор, що фокусує в одній точці» для Південної Каліфорнійської Компанії Едісона у співробітництві з Енергетичним науково-дослідницьким інститутом. Пристрій використовує двигун Стерлінга, щоб виробляти 25 кВт електрики. У випробуваннях генератор перетворив 28 % сонячних променів в електроенергію. Фотоелектричні елементи зазвичай ефективні не більше, ніж на 12 %. Пристрій використовує принцип сфокусованої точки на крупному масштабі. Відбивач складається з дзеркальних панелей, встановлених на землі. Кожну панель можна переміщати окремо. Комп'ютер протягом усього дня

вирівнює всю область, щоб зберігати точку фокусування. У місці фокусування температура досягає 1000 °C (1800 °F) в ясний день, щоб виробити 10 мВт енергії. Розчинні солі переносять теплоту в термічні резервуари для зберігання. Якщо хмари закривають сонце протягом часу більше, ніж 30 хвилин, виробництво зупиняється, поки сонце знову не з'явиться. Два нових резервуари були додані в 1992 р., що дозволило продовжувати виробництво енергії під час хмар. З кліматом Південної Каліфорнії, пристрій може експлуатуватися 60 % часу.

Сонячні колектори відстежують сонце з самого сходу і до заходу. Лінійна система фокусування використовує жолоб, який зосереджує сонячне світло по лінії. Рой Макалістер, що вивчає сонячні колектори, зробив висновок, що параболічний колектор у формі тарілки зосереджує сонячні промені більш ефективно.

Рой Макалістер описав спосіб зберігання теплової енергії без втрат. Тепло перетворює метан і вуглекислий газ в чадний газ і водень. Тепло, збережене в цій формі, може транспортуватися від сонячних областей до віддалених місцеположень, які відчувають нестачу в яскравій сонячній енергії. За допомогою відповідного каталізатора ці два гази можуть бути повторно об'єднані в їх первісну форму з виділенням тепла. Приклад реакції:



Швейцарська компанія Clean Hydrogen Producers (CHP) розробила технологію виробництва водню з води за допомогою параболічних сонячних концентраторів. Площа дзеркал установки становить 93 м². У фокусі концентратора температура досягає 2200 °C. Вода починає розділятися на водень і кисень при температурі понад 1700 °C.

За світловий день 6,5 годин (6,5 кВт·год/м²) установка CHP може розділяти на водень і кисень 94,9 літрів води. Виробництво водню становить 3800 кг/рік (близько 10,4 кг/день).

Ізраїльський Інститут науки Вайцмана у 2005 році випробував технологію отримання неокисненого цинку в сонячній вежі. Оксид цинку в присутності

деревного вугілля нагрівався дзеркалами до температури 1200 °C на вершині сонячної вежі. В результаті процесу отримували чистий цинк. Далі цинк можна герметично запакувати та транспортувати до місць виробництва електроенергії. На місці цинк поміщається у воду, в результаті хімічної реакції утворюється водень та оксид цинку. Оксид цинку можна ще раз помістити в сонячну вежу і отримати чистий цинк.

Технологія пройшла випробування в сонячній вежі канадського Institute for the Energies and Applied Research. Такі відновлювані енергоресурси, як енергія вітру, теплота верхніх шарів океану, гідроенергія, геотермальна енергія та енергія припливів можуть бути використані для отримання водню після перетворення енергії первинних джерел в електроенергію [9].

2.2 Отримання водню за допомогою інших альтернативних джерел енергії

З енергії вітру. Департамент енергетики США (DOE) і Національна дослідницька енергетична лабораторія (NREL) з 2006 року проводить дослідницькі роботи «Водень з вітру». Побудовано водневу заправну станцію з вітрогенератором потужністю 100 кВт. Дослідження мають порівняти методи виробництва водню гідролізом з енергії вітру та енергії з промислової електричної мережі. Вітро-гідролізна система встановлена в Національному вітряному технологічному центрі, що належить NREL. Будуть порівнюватися різні технології гідролізу води, зберігання, їх вартості.

Згідно з розрахунками NREL, у найближчому майбутньому собівартість виробництва водню з енергії вітру становитиме 4,03 дол. за кг водню. У довгостроковій перспективі собівартість водню знизиться до 2,33 дол. за кг водню.

США зможуть щорічно виробляти з енергії вітру 4 класу і вище 154 млрд кг водню.

Зі сміття. Розробляються різні нові технології виробництва водню. Наприклад, у жовтні 2006 р. Лондонське водневе партнерство опублікувало дослідження про можливість виробництва водню з муніципального та

комерційного сміття. Згідно з дослідженням, в Лондоні можна щодня виробляти 141 тонну водню як піролізом, так і анаеробним зброджуванням сміття. З муніципального сміття можна виробляти 68 тонн водню.

141-ї тонни водню достатньо для роботи 13750 автобусів з двигунами внутрішнього згоряння, що працюють на водні. В Лондоні в даний час експлуатується понад 8000 автобусів.

Хімічна реакція води з металами. У 2007 р. Університет Purdue (США) розробив метод виробництва водню з води за допомогою алюмінієвого сплаву.

Сплав алюмінію з галієм формується у пелети. Пелети поміщають у бак з водою. В результаті хімічної реакції утворюється водень. Галій створює навколо алюмінію плівку, що запобігає окисленню алюмінію. В результаті реакції утворюється водень та оксид алюмінію.

З одного фунта алюмінію можна отримати понад 2 кВт · год енергії від спалювання водню і понад 2 кВт · год теплової енергії під час реакції алюмінію з водою. У майбутньому, при використанні електроенергії атомних реакторів 4-го покоління, собівартість водню, отриманого в ході реакції, стане еквівалентною ціні бензину 3 дол. за галон.

Автомобіль середнього розміру з двигуном внутрішнього згоряння з 350 фунтами (158 кг) алюмінію на борту може проїхати 350 миль (560 км). У майбутньому вартість поїздки складе 63 дол., включаючи вартість відновлення оксиду алюмінію на атомній електростанції 4-го покоління.

З біомаси водень отримують термохімічним або біохімічним способами. При термохімічному методі біомасу нагрівають без доступу кисню до температури 500–800 °С (для відходів деревини), що набагато нижче температури процесу газифікації вугілля. В результаті процесу виділяється H_2 , CO і CH_4 .

Собівартість процесу 5–7 дол. за кілограм водню. У майбутньому можливе зниження до 1,0–3,0 дол.

У біохімічному процесі водень виробляють різні бактерії, наприклад *Rodobacter speriodes*. Можливе застосування різних ензимів для прискорення

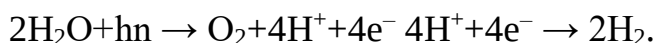
виробництва водню з полісахаридів (крохмаль, целюлоза), що містяться в біомасі. Процес проходить при температурі 30 °C при нормальному тиску. Собівартість водню близько 2 дол. за кг.

Біохімічне виробництво водню. Багатообіцяючою та перспективною альтернативою промисловим процесам отримання водню є розкладання води з використанням сонячної енергії в процесах фотосинтезу та біоконверсії.

В процесі фотосинтезу зелені рослини і морські водорості (мікро-скопичні одноклітинні рослини) перетворюють вуглекислий газ, воду і сонячне світло (зелене світло з довжиною хвилі 500 нм) в вуглеводи, воду і кисень.



Сонячне світло поглинається світлочутливим пігментом, наприклад білком хлорофілу. За допомогою активних центрів цього білка енергія передається електронам, джерелом яких служить деяка донорна речовина. Потім, як і при фотосинтезі, електрони через проміжне з'єднання феродоксин доставляються до іонів водню, відновлення яких до молекулярного стану відбувається під дією каталізатора біологічної природи:



Дослідження в області біологічних методів отримання водню носять поки що пошуковий характер. Вчені каліфорнійського університету в Берклі (UC Berkeley) 1999 р. виявили, що якщо водоростям не вистачає кисню і сірки, то процеси фотосинтезу у них різко слабшають, і починається бурхливе виробництво водню.

Водень може виробляти група зелених водоростей, наприклад *Chlamydomonas reinhardtii*. Водорості можуть виробляти водень з морської води або каналізаційних стоків.

Фахівці, проводячи експерименти з синьо-зеленими водоростями, дійшли висновку, що для забезпечення теплових потреб міста з населенням 1 млн людей і витратою 10 кВт на душу населення потрібно плантація площею 17,5 км². Така оцінка надміру оптимістична, хоча майбутнє біохімічного виробництва водню обіцяє бути блискучим.

При вирощуванні морських водоростей в якості «енергетичного врожаю» необхідно підтримувати високу температуру. Непотрібне тепло від градирень ядерного реактора на 100 МВт підтримає 4047 гектарів водойми з морськими водоростями. Ця водойма призведе до 4,5 кг органічної речовини на квадратний метр. Поставка додаткового вуглекислого газу збільшує норму на 50 %, 22680 кг морських водоростей можуть бути розумно перетворені в 10 кВт · год метану.

Фотохімічні процеси, засновані на використанні енергії сон-ячного світла, дають найбільш довговічне рішення проблеми постачання нашої планети вторинною формою енергії в найбільш екологічно прийнятному вигляді і практично без обмежень за масштабом, і тому заслуговують найпильнішої уваги.

2.3 Розрахункова оцінка характеристик комбінованої енергоустановки.

Зарубіжними вченими розроблено комбіновану енергоустановку електричною потужністю 7,5 кВт, що включає вітрогенератор (ВГ), електролізер, ресивер водню та батарею паливних елементів (БПЕ). Розглянуто та проаналізовано 2 режими роботи: перший, коли вся електроенергія, що виробляється ВГ, йде в електролізер для виробництва водню, який накопичується в ресивері. З ресивера водень надходить у БПЕ, забезпечуючи її безперервну роботу та генерацію електричної потужності і тепла для споживача. Показано, що перевагою цього режиму є постійна робота БПЕ, а недоліком — велика необхідна потужність ВГ, а отже, і вартість всієї установки. Другий режим роботи, коли частина (7,5 кВт) електричної потужності ВГ (якщо є вітер і він працює) подається прямо споживачеві, а решта її частини подається в електролізер для виробництва та накопичення в ресивері водню. Коли ВГ не працює (немає вітру), вмикається БПЕ, яка генерує електричну потужність 7 кВт і тепло для споживача, використовуючи водень з ресивера. Перевагою цього режиму є помірна необхідна потужність ВГ і, відповідно, вартість установки. Недоліки — відсутність тепла в режимі,

коли електроенергія надходить споживачеві прямо з ВГ; необхідність частого вмикання-вимикання БПЕ, що знижує її ресурс.

Багато європейських фірм займається розробкою твердооксидних паливних елементів (ТОПЕ) планарного типу та енергоустановок (ЕУ) на їх основі уже з 1996 р.

В даний час в ведеться розробка та вдосконалення, в основному, двох технологій планарних ТОПЕ (з точки зору несучого елемента): з несучим електролітом і з несучим анодом.

ТОПЕ з несучим електролітом. Основою ТОПЕ є планарний газо-щільний твердооксидний електроліт з YSZ товщиною 250–400 мкм, на який з двох сторін нанесено пористі електроди товщиною, як правило, 20–50 мкм: анод (кермет $\text{NiO} - \text{YSZ}$) і катод з манганіту лантану-стронцію $\text{La}_{0,85}\text{Sr}_{0,15}\text{MnO}_3$ (LSM). Уже розроблено технологію отримання газощільного YSZ-електроліту, яка дозволяє отримувати вироби з високою іонною провідністю, стабільністю та відтворюваністю електрофізичних властивостей, можливістю формування електродних покриттів різними способами. З метою відпрацювання конструкції та технології ТОПЕ на спеціальному лабораторному стенді було проведено випробування понад двохсот одиничних елементів цього типу при температурах до 950 °С. Максимальна густина електричної потужності ТОПЕ, досягнута при цих випробуваннях, склала $\sim 700 \text{ мВт/см}^2$ при робочій температурі 950 °С.

Ведуться роботи з подальшого вдосконалення цієї технології, зокрема, в напрямку подальшого зниження внутрішніх поляризаційних та омичних втрат в ТОПЕ, що дозволить довести густину електричної потужності до 1000 мВт/см². Розробляється технологія створення каталітично активних пористих шарів на межах розділу «електрод - твердий електроліт».

ТОТЕ з опорним анодом і тонкоплівковим електролітом. Провідною тенденцією останніх років є прагнення до максимально можливого зниження вартості виготовлення ТОТЕ та батарей за рахунок здешевлення використовуваних матеріалів і технологій, що дозволило б у найближчі кілька

років перейти до комерціалізації ЕУ на TOTE. На даний час найбільш перспективним напрямком є створення батареї на основі планарного TOTE з опорним анодом і тонкоплівковим (5–20 мкм) твердим електролітом з робочою температурою 750–800 °С. Перехід у цю область робочих температур дозволяє виготовляти майже всі основні компоненти батареї TOTE (крім самого TOTE) з металевих сплавів, що суттєво підвищує технологічність виготовлення батареї та знижує її вартість. Основою TOTE в цьому випадку є порівняно товстий (до 1000 мкм) анодний диск з кермету NiO — YSZ, на який нанесені тонкі шари твердого електроліту (YSZ) та катода (LSM + YSZ). Сьогодні розроблена технологія отримання анодних дисків на основі кермету NiO — YSZ з регульованою пористістю та хорошою провідністю, яка забезпечує необхідну технологічними нормами послідовність термічної обробки при формуванні покриттів твердого електроліту та катода, можливість формування багатошарового анода («активного шару» та колектора). Ця технологія забезпечує підвищену термоміцність TOTE та відтворювана в промисловому масштабі. Відпрацювання цієї технології почалося порівняно недавно.

На даний час на експериментальних зразках планарних TOTE з опорним анодом досягнута щільність електричної потужності ~ 300 мВт/см² при робочій температурі ~ 800 °С. Ведеться подальше вдосконалення цієї перспективної технології.

Одним із цікавих та перспективних застосувань паливних елементів, які зараз інтенсивно досліджуються, є включення їх до складу енергоустановок, що використовують такі відновлювані джерела енергії, як вітри чи припливи. Особливістю цих джерел є непостійність їхньої дії, що значно ускладнює їх використання для енергопостачання споживачів, вимагає застосування різних акумулюючих пристроїв.

Принципова схема комбінованої енергоустановки (КЕУ) невеликої потужності, що включає батарею паливних елементів (БПЕ), вітрогенератор (ВГ), електролізер (ЕЛ), ресивер (РС), наведена на рис. 2.1. Така установка

могла б, наприклад, використовуватися як автономне джерело енергопостачання в тундрі або в горах, де постійно дмуть сильні вітри.

Запишемо основні розрахункові співвідношення:

Електричний ККД БПЕ дорівнює:

$$\eta_{\text{БТЕ}} = 3600 N_{\text{БТЕ}} / (G_{\text{H}_2} H_V), \quad (2.1)$$

де H_V - об'ємна теплота згоряння водню, кДж/нм³.

Зі співвідношення (2.1) легко отримати формулу об'ємної витрати водню для БТЕ:

$$G_{\text{H}_2} = 3600 \cdot N_{\text{БТЕ}} / (\eta_{\text{БТЕ}} H_V). \quad (2.2)$$

Електрична потужність електролізера, що виробляє потік водню, буде дорівнювати:

$$N_{\text{ел}} = \alpha \cdot G_{\text{H}_2}, \quad (2.3)$$

де α — енергоспоживання електролізера, кВт · год/нм³.

ККД електролізера дорівнює:

$$\eta_{\text{ел}} = H_V / 3600 \alpha. \quad (2.4)$$

Так, для $\alpha = 3,9$ кВт · год/нм³ $\eta_{\text{ел}} = 0,77$.

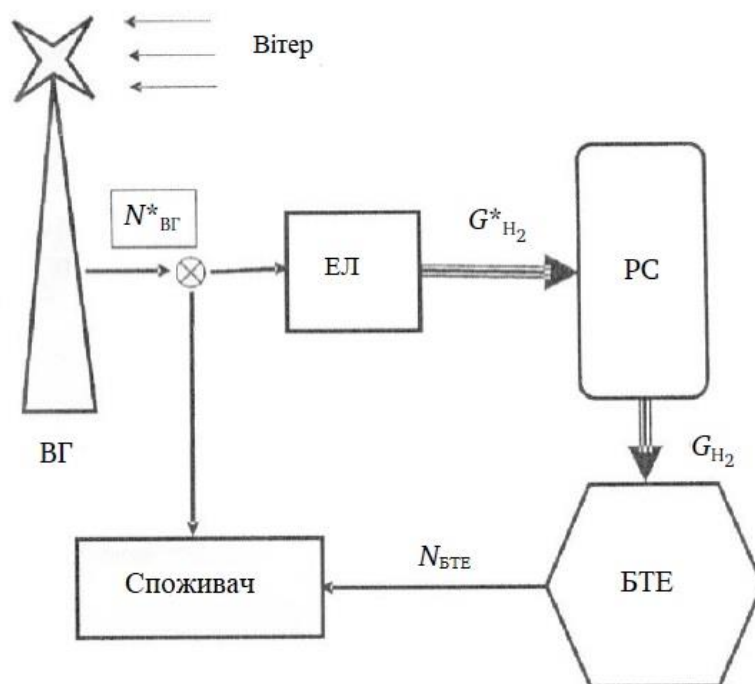


Рис. 7.4. Структура комбінованої енергетичної установки $N_{ВГ}^*$ – електрична потужність ВГ (змінюється залежно від швидкості вітру); $G_{H_2}^*$ – потік водню від електролізера (змінюється залежно від потужності ВГ); G_{H_2} – об'ємна витрата водню з ємності (визначається електричною потужністю БТЕ); $N_{БТЕ}$ – вихідна електрична потужність БТЕ

Розрахуємо G_{H_2} та $N_{ел}$ залежно від $\eta_{БТЕ}$ при $N_{БТЕ} = 7,5$ кВт та $\alpha = 3,9$ кВт · год/нм³

Таблиця 7.1 Результати розрахунків

Параметр	Кількість розрахунків			
	1	2	3	4
$N_{БТЕ}$, кВт	7,50	7,50	7,50	7,50
$\eta_{БТЕ}$	0,29	0,35	0,40	0,45
G_{H_2} , нм ³ /ч	8,39	6,95	6,08	5,40
$N_{ел}$, кВт	32,70	27,10	23,70	21,10
Номінальна електрична міцність ВГ $N_{ВГ}$ при $\psi = 0,4$ кВт	82,00	68,00	59,00	53,00

Як впливає з табл. 2.1, за безперервного режиму роботи батареї паливних елементів із заданою електричною потужністю $N_{БТЕ} = 7,5$ кВт при $\eta_{БТЕ} = 0,29$ (29 %) для забезпечення БТЕ паливом (H_2) необхідний електролізер потужністю не менше 32,7 кВт. Зазначимо, що зі збільшенням $\eta_{БТЕ}$ потрібна потужність електролізера знижується.

Насправді потужність електролізера має бути ще вищою, оскільки він працюватиме лише тоді, коли є подача електроенергії від ВГ, тобто постійно протягом, наприклад, року. Тому величину $N_{ел} = 32,7$ кВт слід розглядати як середнє значення потужності електролізера за рік. Однак, щоб цього досягти, номінальна потужність електролізера має бути істотно вищою.

Розглянемо на прикладах кілька схем побудови КЕУ та їхні характеристики.

Схема № 1. Уся електроенергія, що виробляється ВГ, надходить в електролізер для виробництва водню, який потім надходить у ресивер і там накопичується. З ресивера водень надходить у БТЕ, забезпечуючи її

безперервну роботу. БТЕ генерує електроенергію (7,5 кВт) і тепло для споживача.

Для безперервної роботи БТЕ потужністю 7,5 кВт з ККД = 29 % протягом року (~ 8800 год) необхідно (див. табл. 2.1) $8,39 \text{ нм}^3/\text{год} \cdot 8800 \text{ год} = 73\,832 \text{ нм}^3$ водню.

При цьому до електролізера необхідно підвести $32,7 \text{ кВт} \cdot 8800 \text{ год} = 287\,760 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ електроенергії, яку повинен виробити ВГ.

Річну виробітку електроенергії ВГ характеризують т. зв. потужнісним фактором ψ (Capacity factor), тобто відношенням фактично виробленої енергії за рік до тієї її кількості, яку ВГ міг би виробити за безперервної роботи на номінальній потужності протягом року. За літературними даними ψ зазвичай становить 0,25–0,30. Найкраще значення ψ досягає $\sim 0,4$ (за даними American Wind Energy Association, 2018).

Таким чином, щоб за рік виробити $287\,760 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ електроенергії навіть при $\psi = 0,4$, ВГ повинен мати номінальну потужність $32,7/0,4 = 82 \text{ кВт}$. При $\psi = 0,25\text{--}0,3$ номінальна потужність ВГ становитиме приблизно 110–130 кВт. При цьому ми вважаємо, що передача енергії від ВГ до електролізера відбувається без втрат. Значення $N_{\text{ВГ}}$ для різних ККД батареї паливних елементів наведено в останньому рядку табл. 2.1.

Щоб забезпечити зазначену потужність вітрогенератора, необхідно встановити або один ВГ потужністю 100–130 кВт, або 10–11 іспанських вітроустановок ВК–12 компанії «Borнау» номінальною потужністю по 12 кВт. Очевидно, останній варіант навряд чи прийнятний.

Зробимо вартісні оцінки цієї схеми (за іноземними джерелами, а також матеріалами з інтернету: EWEA, Publications, THE ECONOMICS OF WIND ENERGY).

Питома вартість вітрогенераторів (або питомі капітальні витрати) оцінюється величиною ~ 1000 євро за 1 кВт встановленої потужності. Наприклад, вітрогенератор «Borнау» потужністю 12 кВт коштує 11 733 євро. Оціночна питома вартість електролізера ~ 1000 дол. за $1 \text{ нм}^3/\text{год}$, тобто

електролізер продуктивністю $\sim 8,4 \text{ нм}^3/\text{год}$ може коштувати приблизно 8400 дол.

Огляд світових даних щодо енергоустановок на твердополімерних паливних елементах показує, що в найближчі кілька років їхня ціна може знизитися до 1000–1500 дол. за 1 кВт встановленої потужності, тобто це означає, що ціна установки в 7,5 кВт становитиме 7500–11 250 дол. США. На жаль, ми не змогли знайти даних щодо вартості ресиверів водню, проте вважаємо, що ємності для зберігання водню під тиском коштують недешево.

Що стосується місткості ресиверів для акумуляції водню, то, наприклад, стандартний ресивер ВЕУ-20 1У 01 ємністю 20 м^3 при тиску 10 атм може вмістити 200 нм^3 водню, яких вистачить лише на 24 год ($200/8,39$) роботи БТЕ, що, звичайно, мало.

Стандартний ресивер ємністю 80 м^3 при тиску 9 атм може вмістити 720 нм^3 водню на 86 год роботи БТЕ.

Наприклад, для забезпечення роботи БТЕ протягом тижня потрібно 1400 нм^3 водню, тобто 7 ресиверів ємністю 20 м^3 або 2 ресивери ємністю 80 м^3 .

Схема № 2. Частина енергії ВГ (якщо є вітер і він працює) подається прямо споживачеві (7,5 кВт), а решта її частина подається в електролізер для вироблення та накопичення в ресивері водню. Коли ВГ не працює (немає вітру), вмикається БТЕ, яка генерує електричну (7,5 кВт) і теплову потужність для споживача, використовуючи водень з ресивера. Припустимо, що $\psi = 0,4$. Спрощуючи ситуацію, будемо вважати, що 40% часу в році ВГ працює на номінальній потужності ($8800 \text{ год} \cdot 0,4 = 3520 \text{ год}$), а решта 60% (5280 год) — простоює через відсутність вітру. Таким чином, за 3250 год роботи ВГ повинен виробити $7,5 \text{ кВт} \cdot 3250 \text{ год} = 24\,375 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ електроенергії для споживача і таку кількість електроенергії для електролізера, щоб виробити водню на 5280 год роботи БТЕ при потужності 7,5 кВт в період відсутності вітру, тобто $5280 \cdot 8,39 = 44\,299 \text{ нм}^3$. Ця кількість електроенергії дорівнює $172\,766 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ ($44\,299 \cdot 3,9$). Таким чином, за 3250 год ВГ повинен виробити $197\,141 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ ($24\,375 + 172\,766$) електроенергії, а його номінальна потужність повинна

становити 61 кВт (197 141/3250). Це майже вдвічі менше, ніж у випадку схеми № 1.

І на закінчення зазначимо переваги та недоліки обох розглянутих схем.

Висновки по другому розділу

Схема № 1. Перевага - постійна робота БТЕ з генерацією необхідної кількості електрики та тепла для споживача; недолік — велика потрібна потужність ВГ, а отже, і вартість усієї установки.

Схема № 2. Перевага - помірна потрібна потужність ВГ і, відповідно, вартість установки; недолік - відсутність тепла в режимі, коли електроенергія надходить споживачеві безпосередньо з ВГ, необхідність частого вмикання-вимикання БТЕ, що знижує його ресурс.

РОЗДІЛ 3

ОГЛЯД НОВИХ НАПРЯМКІВ В ОТРИМАННІ ВОДНЮ

3.1. Удосконалення методів електролізу води

Сучасний рівень техніки електрохімічного отримання водню робить цей метод досить економічним для виробництва невеликих кількостей водню, до якості якого висуваються високі вимоги. Для того щоб електроліз води став конкурентоспроможним процесом і задовольняв великих споживачів водню, а також для забезпечення його економічності у вирішенні проблем водневої енергетики, необхідно розвивати та суттєво вдосконалювати технологію електролізу, знижувати собівартість електролітичного водню до рівня, що не перевищує цей показник при інших методах його виробництва [5]. При цьому необхідно вирішити низку складних технічних та економічних завдань. Найбільше значення з них мають:

- зниження питомих витрат електричної енергії на отримання водню та збільшення коефіцієнта корисного використання енергії, що витрачається на електролітичне розкладання води;
- збільшення одиничної потужності електролізерів та підвищення надійності їх роботи;
- зниження питомих капітальних вкладень для організації великого виробництва водню електролітичним розкладанням води.

Розробка нових напрямків розвитку технології електролізу води базується на результатах досліджень цього процесу, проведених в останні десятиліття в різних країнах. У цих розробках також успішно використовується великий досвід досліджень у галузі паливних елементів.

До найважливіших питань і технічних рішень, що використовуються при створенні нових варіантів процесу електролітичного розкладання води, належать такі:

- розробка електродів (анодів і катодів) з каталітично активною (активованою) поверхнею по відношенню до процесів розряду кисню на аноді та водню на катоді для зниження перенапруги на електродах;

- розвиток робочої поверхні електродів з метою інтенсифікації процесу та створення електролізерів більшої потужності, розробка проникних для газів форм електродів і, зокрема, пористих електродів для виведення газів, що виділяються на електродах, що дозволить зменшити відстань між електродами. Це має особливо велике значення при використанні електролізерів, що працюють з високими густинами струму. Так, зменшення втрат напруги в електроліті та діафрагмі за рахунок зниження відстані між електродами від 10 до 5 мм у таких електролізерах дозволяє підвищити коефіцієнт корисного використання енергії на 5–8 %.

У нових процесах електролізу водяної пари та електролізу з твердим полімерним електролітом вдалося знизити цю відстань до часток міліметра;

- розробка електродів з оксидів металів або їх сумішей для роботи при високих температурах, де металеві електроди недостатньо стійкі;

- підвищення робочої температури процесу електролізу в одних варіантах здійснення його до 120–200 °С та в інших до 800–1000 °С, що відкриває нові можливості для зниження витрат електричної енергії на процес розкладання води;

- здійснення процесу електролізу при підвищеному тиску, оскільки це призведе до значного збільшення температури;

- застосування нових конструкційних та захисних матеріалів, стійких при тривалій експлуатації в корозійно-активних середовищах при підвищених температурах. Для захисту деталей електролізерів від корозії при контакті з електролітом знаходять застосування перфторовані полімери. Розробляються також і іонообмінні мембрани на основі перфторованих полімерів.

- відомий спосіб виробництва водню, що полягає у використанні глибинних високотермальних вод у місцях підводної вулканічної діяльності для виробництва електроенергії, що подається на електроліз води, в результаті якого отримують водень. До недоліків даного способу слід віднести складність його апаратурного оформлення.

3.2 Фотогальванічні процеси для одержання водню

Сонячний електричний водень. Різні науково-дослідні роботи демонструють, як функції сонячних елементів та елементів електролізу можуть бути об'єднані в одному пристрої, використовуючи один або більше фотоелектродів чи фотокаталізаторів. Світло, що падає на фотоелектрод, виробляє електричний потенціал (напругу) на поверхні напівпровідника та електроліту. Цей потенціал сприяє розкладанню води на водень та кисень. Гази виробляються разом, тому необхідний певний засіб розділення.

Довжини хвиль сильного ультрафіолетового світла мають достатньо енергії для розпаду води. Цей процес неефективний, тому що ультрафіолетове світло становить лише 8 % сонячного випромінювання.

Фотоелектроди. Певні хімічні елементи можуть перетворювати ширший спектр світла в електролітичну енергію, що робить використання сонячного спектра більш ефективним. Відповідні матеріали містять трохи солей, органічні барвники, напівпровідники, що поглинають ширший спектр світла (ширина забороненої зони має бути більшою ніж 2.3 електронних вольт). Деякі різновиди морських водоростей мають ці властивості. Матеріали фотоелектрода загалом можуть мати одну або більше з таких проблем:

- фотокорозія, що викликає розкладання через легке пошкодження електрода;

- невідповідність температур: фотогальванічні процеси більш ефективні за низької температури, електролітичні реакції протікають за вищої температури;

Водень в енергетиці - невідповідність напруг: вихідна напруга фотоелектрода (1,5 Вт) не відповідає напрузі, необхідній для електролізу (2,2 Вт).

Ці проблеми змусили деяких дослідників зробити висновок, що використання безлічі сонячних елементів іншими шляхами є кращим. Інші дослідники продовжують працювати, оцінивши переваги єдиного процесу, який перетворює світло безпосередньо у водневе паливо. У пошуку речовин на роль фотоелектродів оксиди сірки та фосфору були виключені.

Змішування оксиду заліза та діоксиду титану з кремнієм виробляє фотоанод. Оксид заліза та оксид магнію включає фотокатод. Два електроди поміщені в електроліт з водою, за наявності світла виробляється електролітичний водень та кисень. Реакція зазвичай не потребує вхідної напруги. Однак, що технічно можливо, не обов'язково економічно. Дешевий доступний процес виробництва діоксиду титану зараз недоступний.

У ході експериментів порівняли дешевий цинк та сульфід кадмію з іншими речовинами у вигляді плівки на діоксиді силікону з великою кількістю платини, змішаної з сульфідом кадмію. Висновок був таким:

- ефективне фотографування допомогло виробити водень без участі благородного металевого каталізатора;
- речовина для поверхневого покриття цинку та сульфиду кадмію не є настільки важливим елементом;
- необхідний тісний контакт цинкового сульфиду та кадмію.

В інших експериментах 1 гр (0,002 фунта) сульфиду цинку, поміщеного в електроліт, виробив 16 л водню через 35 год без помітної дезактивації фотокаталізатора. При цьому не було жодної потреби в платині, щоб посилити перенесення заряду.

Електроліз сульфиду водню. Деякі речовини, що містять водень, легше піддаються електролізу, ніж вода. Наприклад, сульфід водню — похідна природного газу, вугілля та переробки нафти. На електроліз сульфиду водню потрібно лише 1/7 кількості енергії, що витрачається на електроліз води. Енергія, необхідна для розпаду сульфиду водню, досить низька, тому можна використовувати світло як джерело енергії для розпаду молекули

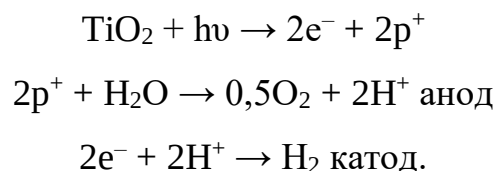


В одному експерименті певний діапазон довжини хвилі стимулює сульфід кадмію, щоб випустити електрон, який сприяє розпаду водневого сульфиду. Діоксид рубідію (0,1 % за масою) був змішаний з сульфідом кадмію, щоб сформувати каталізатор. Каталізатор був розчинений у 0,1 молях розчину сульфиду натрію, освітленого галогенною лампою на 250 Вт, що світила через

15 см водяного стовпа для того, щоб видалити інфрачервону частину спектра. У результаті експерименту отримаємо наступне: запобігає нагріванню розчину; 25 мл розчину виробило 2,3 мл водню за годину; 90 % сірководню було перетворено на водень. Подвоєння кількості діоксиду рубідію збільшило виробництво водню на 50 %. При цьому платина як електричний каталізатор не знадобилася. Інші експериментатори, використовуючи ті ж самі хімічні елементи, виявили термодинамічний коефіцієнт корисної дії, що дорівнює 2,85 %. Експериментатори зробили висновок:

Окрім його важливості для дослідження сонячної енергії, процес міг би використовуватися в індустріальних процедурах, де H_2S або сульфіді сформовані як непотрібний продукт, швидке видалення якого та перетворення на паливо бажані. Крім того, ці системи інтригуючим способом імітують функції фотосинтетичних бактерій, які часто використовують сульфіді як електронні донори для скорочення води до водню.

Фотохімічне виробництво водню. Отримання водню за методом фотолізу ґрунтується на здатності поглиненого кванта світла розривати водневі зв'язки в молекулі води або інших водневмісних сполуках [10]:



Ефективність його незначна і залежно від виду комірки становить від 3 до 11 %. Оцінити економічні показники цього методу поки що досить важко.

Британська компанія Hydrogen Solar розробила фотоелектрохімічний метод розкладання води Tandem Cell, при якому розкладання води на водень та кисень відбувається в тонкому шарі між двома фотоелектродами, що перетворюють сонячну енергію на електричний струм. ККД процесу автори оцінюють у 8 %. Дослідна установка фотохімічного розкладання води площею близько 65 см^2 , що працює в лабораторії Hydrogen Solar, виробляє кілька кілограмів водню на день.

За оцінкою вчених, якщо ККД системи довести до 10 % і покрити такими панелями дах гаража, то можна виробляти водень, достатній для річного пробігу автомобіля на паливних елементах у 17 тисяч кілометрів.

Системи сонячної енергії. Texas Instruments мають одну з небагатьох комерційних фотоелектрохімічних програм. Бромистоводнева кислота використовуються як фотоелектрод з електролітом із сірчаної кислоти та води. Фотоелектрод покритий мікросферами 0,25–0,40 мм у діаметрі. Мікросфери - фотоаноди та фотокатооди. Фотоаноди виділяють бром, тоді як водень з'являється на фотокатодах. Електроліт знаходиться між двома скляними листами; один лист має струмопровідне покриття. Сонячне світло потрапляє через прозору сторону та виробляє водень з 7 %-им ККД.

Головний покупець - Southern California Edison electric company (електрична компанія Едісона в Південній Каліфорнії). Панелі могли розташовуватися на дахах будинків. Однокіловатні панелі могли виробляти 1/3 електрики, необхідної будинку. Але несподівано низька ціна енергії скоротила попит.

Висновок по третьому розділу

Фотоелектроди використовують або напівпровідниковий порошок, або сенсibilізатор, які перетворюють електрони водних молекул. У порівнянні з електролізом за участю сонячного елемента, фотохімічне виробництво змішує водень і кисень, роз'їдає електроди і має низьку ефективність [11].

ВИСНОВОК

Незважаючи на особливості економічного розвитку різних держав, тенденція зростання пріоритету досліджень і розробок у галузі водневих енерготехнологій наразі характерна для більшості країн світу. Основними мотивами, що обумовлюють зростання інтересу до цієї тематики національних урядів, великих міжнародних організацій та комерційних компаній, є прагнення до енергетичної безпеки, занепокоєність глобальним погіршенням екологічної обстановки та клімату, пошук загальнодоступних джерел енергії, необхідність інвестицій у сучасну інфраструктуру енергозабезпечення.

Аналіз динаміки загальносвітового попиту на енергію показує, що за збереження існуючої енергетичної політики частка вуглеводневих палив у балансі первинних енергоджерел буде неухильно зростати і становитиме до 2040 р. 90 % приросту енергоспоживання. Більша частина зазначеної потреби покриватиметься за рахунок нафти, 75 % якої споживатиметься автотранспортом. Потреби інших споживачів (енергетика, промисловість) в основному задовольнятимуться за рахунок природного газу та, меншою мірою, вугілля. В результаті обсяг міжнародної торгівлі вуглеводневими паливами збільшиться відносно ситуації на 2020 р. удвічі. Це призведе до суттєвого зростання економічної залежності країн-імпортерів.

В наслідок виснаження світових запасів органічного палива, що є енергоносієм для невідновлюваної енергетики, перед людством постає завдання своєчасно знайти та навчитися ефективно використовувати нові джерела енергії та енергоносії. Головним претендентом на роль такого енергоносія є водень. Очікується, що через 10–15 років водень у технічно розвинених країнах почне активно витісняти та поступово витіснить органічні енергоносії з ринку енергії.

У перехідний період для виробництва водню активно використовуватимуться методи хімічного перетворення органічних енергоносіїв та поступовий перехід на прямі методи його отримання шляхом електролізу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Воднева стратегія України: проект/ Інститут відновлюваної енергетики НАН України. – Київ, 2021.-91с.
2. Звіт МЕА "Майбутнє водню". 2019 рік. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>
3. Д. Г. Бобро. ПРОБЛЕМНІ ПИТАННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ВОДНЕВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ В УКРАЇНІ / Національний інститут стратегічних досліджень// <https://niss.gov.ua/sites/default/files/2021-03/voden.pdf>
4. Перспективи розвитку водневої енергетики в Україні та країнах ЄС / Р. А. Захарова, Н. О. Бубліснко, О. М. Салавор, О. В. Ничик // Recent advances in scientific world : Proceedings of the 1st International Scientific and Practical Conference, 18 – 19.12.2021. – Monterrey, Mexico : Mendez Editores. – P. 505–508.
5. ВОДНЕВА СТРАТЕГІЯ УКРАЇНИ на період до 2050 року: проект/ <https://www.mev.gov.ua/sites/default/files/field/file/vodnevastrategiya17.05.2024.pdf>
6. КРАВЧИК, Ю., КАТКОВА, Т., & АНДРУНЦІВ, В. (2024). ІННОВАЦІЙНІ РІШЕННЯ ДЛЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА ВОДНЮ: ПЕРСПЕКТИВИ ДЛЯ УКРАЇНИ. Herald of Khmelnytskyi National University. Economic Sciences, 336(6), 613-618. <https://doi.org/10.31891/2307-5740-2024-336-92>
7. <https://saee.gov.ua/news/voden-iaak-svit-rozvivaje-energetiku-maibutnyogo-i-iaak-ne-vidstavati-ukrayini>
8. Воднева енергетика. Міністерство енергетики України. URL: <https://www.mev.gov.ua/reforma/vodneva-enerhetyka> .
9. Воднева стратегія України: проект / Міністерство енергетики України. Київ, 2024. 54 с. URL: <https://surl.li/etxhgi> .
10. Данія інвестує 19 млн доларів США у виробництво водню. Avenston. URL: <https://avenston.com/articles/daniya-h2/> .

11. Ємельяненко Л. М., Дмитрієва О. В. Контент-аналіз стратегічних ініціатив розвитку водневої економіки різних країн світу та України. Трансформаційна економіка. 2024. № 3 (08). С. 26–36. DOI: <https://doi.org/10.32782/2786-8141/2024-8-4>
12. Замазєєва Г. Водень: як світ розвиває енергетику майбутнього і як не відставати Україні. Економічна правда. URL: <https://www.epravda.com.ua/columns/2023/08/17/703302/>.
13. Зеленько О. О., Гуцан Т. Г., Осьмірко І. В. Воднева енергетика та перспективи її розвитку в економіці України. Бізнес Інформ. 2022. № 8. С. 20–26.
14. Каденський М. Водень називають інноваційним енергоносієм майбутнього. Як він може перекроїти глобальну енергетику. Журнал Forbes Ukraine. URL: <https://surl.li/lrnnff> (дата звернення: 02.09.2024).
15. Кудря С. О., Репкін О. О., Яценко Л. В., Шинкаренко Л. Я., Ткаленко М. А. Концепція дорожньої карти розвитку водневої енергетики України на період до 2035 року. Відроджувана енергетика. 2019. № 4. С. 22–28.
16. Ободович О. М., Переяславцева О. О., Целень Б. Я., Резакова Т. А. Реалії сьогодення та перспективи майбутнього розвитку водневої енергетики у світі та в Україні. Теплофізика та теплоенергетика. 2024. Т. 46. № 2. С. 52–61.
17. Репкін О. Водень як паливо – світовий тренд. Досвід яких країн і для чого може перейняти Україна. LIGA.net. URL: <http://surl.li/atnxrr> (дата звернення: 19.09.2024).
18. Стельмашенко Ю. О., Філіппова В. Д. Державна політика розвитку водневої енергетики як альтернативного джерела енергії. Вісник ХНТУ. 2023. № 1(84). С. 244–249. DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2023.1.34>
19. Шевченко В. Г., Ляшенко В. І., Осадча Н. В. Світові тенденції розвитку водневої енергетики. Вісник економічної науки України. 2021. № 2. С. 17–26.

20. Шрайбер О. А., Дубровський В. В., Тесленко О. І. Сучасний стан і перспективи розвитку водневої енергетики у світі. Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2021. Т. 32 (71). № 5. С. 199–209.

21. Ярошенко Я. В., Бобров О. В., Колб А. А., Ципленков Д. В., Гребенюк А. М., Лобода А. Ю. Водень та перспективи водневої енергетики. Збірник наукових праць Національного гірничого університету. 2023. № 75-8. С. 85–96.

22. Discover the Top 10 Hydrogen Trends in 2025. StartUs Insights. URL: <https://www.startus-insights.com/innovators-guide/top-10-hydrogen-economy-trends-innovations-in-2021/> .

23. <https://core.ac.uk/download/343953666.pdf>

24. http://znc.com.ua/ukr/publ/periodic/bulletin/2009/buleten_znc_2009.doc

25. Hydrogen Market by Sector (Generation Type (Gray, Blue, Green), Storage (Physical, Material), Transportation (Long, Short)), Application (Energy (Power, CHP), Mobility, Chemical & Refinery (Refinery, Ammonia, Methanol)), Region - Global Forecast to 2030. MarketsandMarkets. URL: <http://surl.li/ietnov> .

26. The Rise of Green Hydrogen: Stats, Trends, and Future Projections. Plug. URL: <https://www.plugpower.com/the-rise-of-green-hydrogen-stats-trends-and-future-projections/> (дата звернення: 11.09.2024).

27. The Rise of Green Hydrogen: Stats, Trends, and Future Projections. Plug. Available at: <https://www.plugpower.com/the-rise-of-green-hydrogen-stats-trends-and-future-projections/> .