

ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ В ЕНЕРГЕТИЦІ

TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT IN ENERGY

УДК 620.93:662.769.2

DOI 10.20535/1813-5420.3.2025.339743

Д.О. Босий¹, д-р. техн. наук, професор, ORCID 0000-0003-1818-2490
О.В. Жевжик¹, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-8938-9301
Є.О. Наумов¹, студент, ORCID 0009-0001-8968-8942
А.В. Антонов¹, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0001-5701-6087
І.Ю. Потапчук¹, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-5985-1040
І.В. Кондратюк², аспірант, ORCID 0009-0004-2174-6298
¹Український державний університет науки і технологій
²Державний торговельно-економічний університет

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ НАКОПИЧУВАННЯ ТА ВИКОРИСТАННЯ ВОДНЮ НА ОСНОВІ ЕЛЕКТРОЛІЗЕРА ТА ПАЛИВНОГО ЕЛЕМЕНТА

Метою статті є аналіз ефективності електролізу води як методу виробництва та накопичення водню, а також оцінка перспектив його використання у паливних елементах для зберігання та перетворення енергії.

Розглянуто три основні методи електролізу: лужний, мембранний (PEMEL) та високотемпературний (HTES). Дослідження підтверджують, що ефективність процесу значною мірою залежить від температури та електрохімічних параметрів, а оптимальний температурний діапазон для електролізу води становить 373–400 К. Особливу увагу приділено кінетичним факторам, таким як перенапруги на електродах, омичні втрати та утворення газових бульбашок, які можуть знижувати продуктивність електролізерів.

PEM-електроліз визначено як одну з перспективних технологій виробництва водню завдяки високій швидкості реакції та можливості інтеграції у компактні системи. Крім того, досліджено ефективність паливних елементів на основі протонообмінної мембрани (PEMFC), які можуть використовуватися у мобільних і стаціонарних енергетичних системах.

Висновки роботи підтверджують доцільність подальшого розвитку електролітичних технологій для виробництва водню, що відкриває можливості для їх впровадження у сфері відновлюваної енергетики та транспорту.

Ключові слова: електроліз води, водневі технології, PEM-електроліз, паливні елементи, накопичення енергії, енергетична ефективність.

Вступ. Водень відіграє ключову роль у сучасних стратегіях зберігання та використання енергії завдяки своїй високій енергетичній щільності. Проте його виробництво пов'язане зі значними енергетичними витратами, що визначаються законами термодинаміки. Саме тому ефективність технологій отримання водню, а також джерела енергії, що використовуються, є вирішальними факторами при порівнянні його з іншими методами накопичення енергії.

Наразі водень переважно отримують із викопних джерел, таких як природний газ, рідкі вуглеводні та вугілля, що значно обмежує його екологічну привабливість. Проте, використання відновлюваних джерел енергії в процесі електролізу води може зробити виробництво водню кліматично нейтральним. Незважаючи на значний потенціал, економічна життєздатність таких методів значною мірою залежить від витрат на енергію та розвитку технологій.

Електроліз води залишається одним із найперспективніших способів виробництва водню, особливо у поєднанні з відновлюваними джерелами енергії. Це технологія, відкрита понад 200 років тому, сьогодні є основою концепцій Power-to-Gas (PtG) та Power-to-Liquid (PtL), що дозволяють перетворювати електроенергію в хімічну енергію для подальшого зберігання та використання. Серед основних методів електролізу виділяють лужний електроліз (AEL), мембранний електроліз (PEMEL) та високотемпературний електроліз (HTES), кожен з яких має свої особливості та сфери застосування.

Актуальність застосування водневих паливних елементів викликає значний науковий інтерес до цієї теми. Варто підкреслити, що вона привертає увагу вчених з усього світу та з різних наукових дисциплін, таких як хімія, фізика, машинобудування, екологія, економіка, політика тощо. Серед українських науковців, які досліджують проблеми виробництва та використання водню як енергоносія, можна відзначити: Дубровського В.В., Гайдучього І.П., Гесця В.В., Войтко С.В., Шрайбера О.А., Кузнецова М.П., Колешню Я.О., Кудрю С.О., Солоніну Ю.М., Дорошенка Я. В. [1], Морозова Ю.П., Яртіся В.А., Трофименка О.О., Завалію І.Ю., Ташеєва Ю.В., Тесленка О.І. та інших [2]. Серед зарубіжних дослідників, які займаються водневими технологіями та можливостями переходу до водневої економіки, виділяються: Akinyele D. [3], Andre L. P. [4], Felseghi R.-A. [5], Andrews J. [6], Audus H., Afgan N., Bossel U., Brandon N., Fan L. [7], Kurban Z., Carvalho M., Chi J., Glenk G., Gross R., Kaarstad O., Kowal M., Matsuda H., Otto W., Patzelt A., Rifkin J., Nagami M., Theijssen J., Shabani B., Wanner M., Yu H. та інші [2]. Цей широкий науковий інтерес підкреслює різноманітність досліджуваної проблеми та наголошує на необхідності подальшого вивчення можливостей розвитку водневої економіки у сучасному світі.

Дослідження ефективності накопичення та використання водню на основі електролізера та паливного елемента є актуальним у контексті переходу до сталої енергетики. В цій роботі розглядається експериментальне дослідження даної технології, аналізуються її ефективність, переваги та обмеження, а також перспективи впровадження у різних галузях промисловості.

Метою статті є дослідження принципу роботи модулю водневих паливних елементів для генерації енергії та визначення його ефективності.

1. Огляд способів виробництва водню

Висока енергетична щільність водню є його найбільшою перевагою порівняно з іншими технологіями зберігання. Але цей високий рівень хімічної енергії також необхідний для виробництва водню з води або інших матеріалів і визначається законами термодинаміки. Як наслідок, джерело енергії, що використовується, та ефективність його виробництва є вирішальними технічними та енергетичними факторами при порівнянні водню з іншими технологіями.

Водень можна виробляти різними способами (рис. 1). Окрім електролізу води, який має особливе значення для зберігання енергії, стандартно застосовуються також термічні процеси. Як джерело енергії можна використовувати електричну, теплову та хімічну енергію, а також енергію електромагнітного випромінювання (світлову енергію фотонів). Хоча викопні джерела енергії домінують у виробництві водню, виключно використання відновлюваної енергії може зробити виробництво водню кліматично нейтральним.

У промислових масштабах водень зараз виробляють переважно за допомогою парових реформерів. У цьому процесі реформуються вуглеводні з високим вмістом водню, такі як метан або метанол. Інші процеси перетворення, такі як хлорно-лужний електроліз або газифікація вугілля, використовують викопну сировину.

У всьому світі виробляється близько 500 млрд м³ або близько 50 млн тон, що становить близько 2% світового споживання первинної енергії. У всьому світі водень виробляється майже виключно з викопних вуглеводнів:

- а) природного газу (48%);
- б) рідких вуглеводнів (30%);
- в) вугілля (18%);
- г) електроліз води (4%).

Споживання водню у світі важко оцінити кількісно. Це пов'язано з тим, що великі обсяги виробляються і споживаються на території хімічних парків і, як наслідок, не включаються до статистики. Водень часто безпосередньо повторно використовується як компонент синтез-газу. У всьому світі синтез-газ використовується для:

- а) 51% для виробництва аміаку;
- б) 35% на нафтопереробних заводах для процесів гідрогенізації;
- в) ~ 8% для виробництва метанолу.

Як і синтез-газ, сам водень також використовується переважно для цих трьох застосувань. У 2023 році водень використовувався для наступних застосувань:

- а) 45% для виробництва аміаку (добрива);
- б) 46% на нафтопереробних заводах для відновлення та гідрування довголанцюгових вуглеводнів з метою отримання бензину, дизельного палива або гасу (наприклад, для гідрокрекінгу та гідродесульфуризації);
- в) 4% для виробництва метанолу (наприклад, для використання в якості основного хімічного матеріалу);
- г) 2% у виробництві та обробці металів (наприклад, у металургії як захисний);
- д) 1% газ для зварювання та різання;

- е) 1% в електронній промисловості (наприклад, для виробництва напівпровідників);
- ж) 1% у харчовій промисловості (наприклад, для гідрогенізації рідких олій до твердих жирів, наприклад, рослинної олії до маргарину);
- з) 1% в інших процесах (наприклад, гідроформілювання, яке також називають оксо-синтезом, або як охолоджуючий агент для великих синхронних генераторів на звичайних електростанціях).

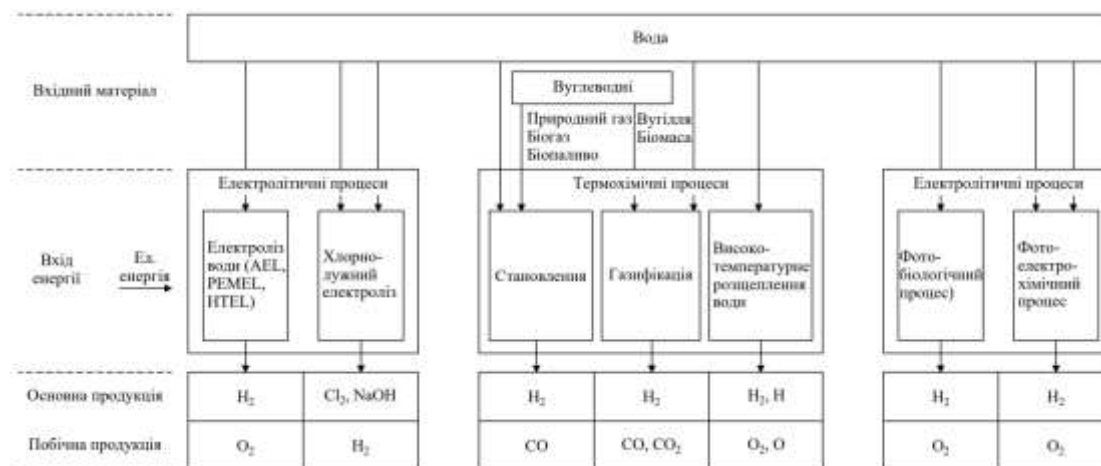


Рисунок 1 – Способи отримання водню

Традиційно водень виробляють переважно шляхом риформінгу природного газу. Це пов'язано з тим, що при собівартості 1 євро/кг цей процес має найнижчі виробничі витрати. Для порівняння, вартість водню з відновлюваних джерел енергії наразі коливається від 6 до 10 євро/кг. Як наслідок, зовнішні витрати, пов'язані з вивантаженням CO₂, є ключовим фактором у визначенні економічної життєздатності відновлюваного водню.

2. Електролітичні технології у сфері зберігання енергії

Електролітичне розщеплення води, відкрите понад 200 років тому, в принципі, не є новою технологією. Але в контексті зберігання енергії з використанням PtG і PtL воно стало найважливішим ключовим компонентом хімічного зберігання енергії.

Відкриття вольтового стовпа в 1799 році, по суті, першого надійного, безперервного джерела електроенергії - призвело до перших експериментів з електролізом. Цей принцип був відкритий у 1800 році вченим Йоганном Вільгельмом Ріттером в Німеччині і в той же час Вільямом Ніколсоном, Ентоні Карлайлом і Вільямом Крукшенком в Англії.

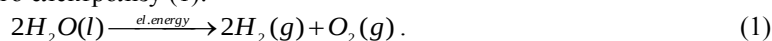
Ріттер продемонстрував, що гальванічний водень і кисень без запаху утворюються шляхом розкладання води. У своєму відгуку на статтю Ріттера видавець журналу і колишній вчитель Ріттера Йоганн Генріх Фойгт назвав газову суміш, отриману в результаті електролізу, «життєвим повітрям», або займистим повітрям, яке при запалюванні виділяло тепло, світло і воду. Фойгт висунув гіпотезу, що «зігріваючий і сяючий елемент сонячного світла» містився в газах або в силах, які вони передавали в оренду. Ця обґрунтована гіпотеза ґрунтувалася на спостереженні, що киснево-водневі реакції виділяють тепло і променеву енергію, подібно до Сонця. Крім того, Фойгт раніше визнав, що цей процес відіграє певну роль у фотосинтезі.

Таким чином, реверсування киснево-водневих реакцій шляхом електролізу води за допомогою сонячної енергії є процесом, що імітує природу.

Перші експерименти, проведені в 1800 році, призвели до відкриття трьох основних процесів електролізу води, які використовуються і сьогодні:

- а) лужний електроліз (AEL);
- б) мембранний електроліз або кислотний електроліз (протонообмінна мембрана) PEMEL; високотемпературний електроліз (електроліз твердих оксидів) HTES або SOEL.

Вуглецево-нейтральні методи отримання водню, як правило, базуються на водних електролізах. Нижче наведено повне рівняння водного електролізу (1):



Енергія, необхідна для розщеплення води, визначається рівнянням Гіббса-Гельмгольца (2):

$$\Delta H_R = \Delta G_R + T \cdot \Delta S_R, \quad (2)$$

де ΔH_R – корисна ентальпія реакції, $\Delta H_R^0 = 285,83 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$;

ΔG_R – вільна ентальпія реакції або потенціал Гіббса, $\Delta G_R^0 = 237,13 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$;

T – температура в Кельвінах;

ΔS_R – зміна ентропії.

Нуль в індексі фізичної розмірності означає, що приймаються нормальні умови: температура $T = 298,15 \text{ К}$ (25°C) і тиск $p = 1,013 \text{ гПа}$ (1 бар).

Електроліти – це, як правило, водні розчини солей, кислот і вилуговувачів. Напруга, необхідна для їх електролізу, визначається двома законами Фарадея:

а) кількість речовини, що осаджується з електроліту n , пропорційна заряду $Q = I \cdot t$, що протікає через провідник

$$n = k \cdot I \cdot t; \quad (3)$$

б) один і той самий заряд Q завжди призводить до однакової кількості матеріалу, осадженого на різних електродах

$$k = \frac{l}{z \cdot F}.$$

Отже, кількість матеріалу n дорівнює

$$n = \frac{I \cdot t}{z \cdot F}, \quad (4)$$

і заряд Q (5):

$$Q = n \cdot z \cdot F, \quad (5)$$

де k – електрохімічний еквівалент електроліту;

z – кількість електронів, що обмінюються (при розщепленні води $z = 2$);

F – постійна Фарадея, похідна від елементарного заряду та постійної Авогадро: $F = 26,8 \text{ А} \cdot \text{год}$;

I – сила струму в електроліті;

t – час протікання струму.

Електрична енергія, необхідна для розкладання

$$W_{el} = U \cdot Q = U \cdot I \cdot t. \quad (6)$$

Якщо електричну енергію W_{el} прирівняти до ентальпії реакції ΔG_R і розв'язати рівняння для напруги, коли закон Фарадея для $n = 1$ моль інтегрується в рівняння, то результатом буде теоретична мінімальна напруга розкладання, або оборотна напруга комірки

$$U_{rev} = \frac{\Delta G_R^0}{n \cdot z \cdot F} = \frac{237,2 \text{ кДж}}{1 \text{ моль} \cdot 2 \cdot 96,486 \text{ А} \cdot \text{с} / \text{моль}} = 1,23 \text{ В}. \quad (7)$$

Оскільки через ентропію ΔS_R повна енергія, що використовується, є вищою, то напруга термонеїтрального розкладу є вищою

$$U_{th} = \frac{\Delta H_R^0}{z \cdot F} = \frac{285,9 \text{ кДж}}{1 \text{ моль} \cdot 2 \cdot 96,486 \text{ А} \cdot \text{с} / \text{моль}} = 1,48 \text{ В}. \quad (8)$$

Ці цифри відображають термодинамічну ефективність, яка еквівалентна максимально досяжній ефективності електролізу води, коли вона знаходиться в рідкому стані.

В таблиці 1 представлені значення параметрів для розщеплення води у двофазній системі і в газозфазній реакції.

Таблиця 1. Параметри величин розщеплення води

	Двофазна система (вода в рідкому вигляді, 25°C , 1 бар)	Газофазна реакція (вода в газоподібному стані, 100°C , 1 бар)
Потенціал Гіббса ΔG , кДж/моль	237.13	228.57
Ентальпія зв'язку ΔH , кДж/моль	285.83	241.82
Термодинамічна ефективність, %	83.0	94.5
Оборотна напруга комірки, В	1.23	1.18
Напруга термонеїтрального розкладу, В	1.48	1.25
Температурна залежність оборотної напруги, мВ/К	-0.85	-0.23
Температурна залежність термонеїтральної напруги, мВ/К	0	0.046

На рис. 2 показано температурні залежності різних параметрів. Слід зазначити, що ентропія зростає разом з температурою, а ефективність падає разом з температурою. Як наслідок, ідеальна температура для електролізу води (пари) коливається від 373 до 400 К. На практиці, звичайно, технічно складно підтримувати ці ідеальні умови.

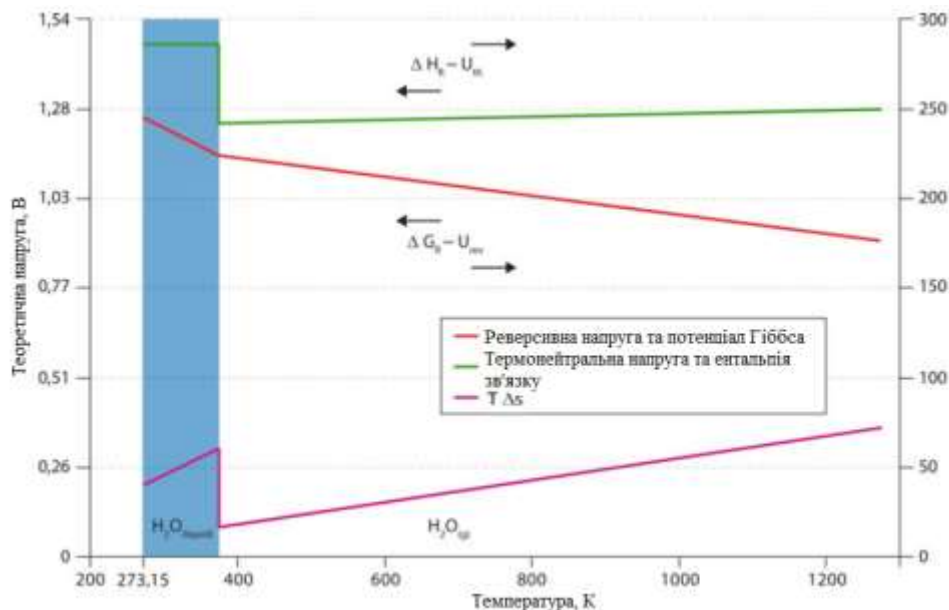


Рисунок 2 – Температурні залежності стандартних параметрів

3. Кінетичні ефекти та визначення спаду напруги в електролізних елементах

Як і у випадку з акумуляторами, кінетичні ефекти, що спричиняють падіння напруги в елементі, також відбуваються при електролізі. Подібно до тертя в інженерній механіці, часткові процеси, такі як дифузія, міграція або адсорбція носіїв заряду, спричиняють «втрати на тертя», які можна виявити за падінням напруги. На додаток до мінімальної напруги розкладання U_{rev} , ці «перенапруги» на катоді, аноді, і, можливо, на діафрагмі або мембрані, також необхідно враховувати при електролізі води. Коли носії заряду активуються, ці перенапруги з'являються як поляризаційні втрати на межі між електродами та електролітами. Вони залежать від матеріалу електродів і газів, що виділяються (рис. 3).

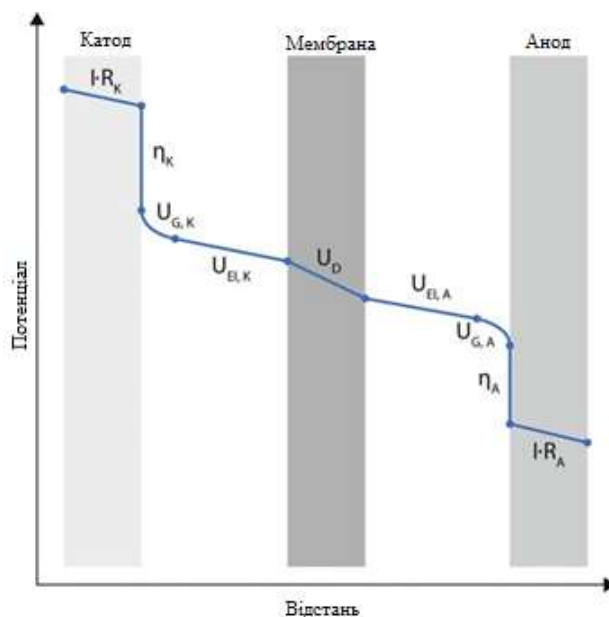


Рисунок 3 – Потенційна діаграма напруг в електролізері

Крім того, існують незворотні втрати, які залежать від густини струму, і, як у всіх електричних системах, омичні втрати, спричинені внутрішнім опором ланцюга. В результаті, в реальності фактична напруга на коміріці U_{cell} коливається від 1,5 до 2,0 В і визначається за формулою

$$U_{cell} = U_{rev} + I \cdot (R_A + R_K) + U_{El.A} + U_{El.K} + U_{G.A} + U_{G.K} + U_D + |\eta_A| + |\eta_K|, \quad (9)$$

де $I \cdot (R_A + R_K)$ – омичний спад напруги на електродах – лінійно залежить від сили струму;

$U_{El.A}/U_{El.K}$ – омичний спад напруги в електроліті, лінійно залежний від сили струму;

η_A – перенапруга на аноді, логарифмічно залежна від сили струму;

η_K – перенапруга на катоді, логарифмічно залежна від сили струму;

$U_{G.A}/U_{G.K}$ – падіння напруги, спричинене утворенням газових бульбашок між електродами та діафрагмою – лінійно залежить від сили струму;

U_D – лінійно залежне від сили струму омичне падіння напруги на мембрані.

Омичні втрати на електродах можна мінімізувати, забезпечивши їх хороший контакт і зменшивши утворення оксидних шарів.

Падіння напруги в електроліті можна зменшити, максимально зменшивши відстань між електродами та збільшивши електролітичну провідність. Перенапруги на аноді та катоді можна зменшити за допомогою термічної активації, тобто підвищення температури електроліту, або каталітичної активації електродів.

Утворення газових бульбашок між електродами і діафрагмою призводить до утворення електролітно-газової суміші зі значно нижчою провідністю, ніж у чистого електроліту. Крім того, газові бульбашки на електродах зменшують площу активної поверхні. Щоб мінімізувати втрати газових бульбашок, слід використовувати газопроникні електроди, де це можливо. Це дозволяє газам продукту на зворотному боці електрода швидше відходити.

Омичні втрати U_D виникають тільки в комітках з діафрагмою або мембраною. Вони відіграють вирішальну роль, коли електроди розміщені безпосередньо на діафрагмі (мембрані).

У спрощеному вигляді загальну ефективність з урахуванням усіх питомих втрат можна сформулювати

$$\eta_{ges} = \frac{U_{rev}}{U_{cell}}. \quad (10)$$

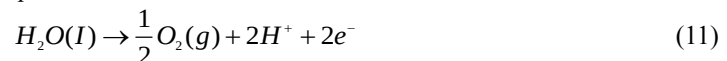
4. Особливості електролізу та виробництва електроенергії з використанням протонообмінної мембрани

Мембранний електроліз, або PEM-електроліз (PEM означає протонообмінна мембрана), був розроблений на основі технології паливних елементів і базується на зворотних процесах паливного елемента.

Електролізний елемент PEM (рис. 4) складається з протонообмінної мембрани (PEM), зазвичай з'єднаної з обох боків з електродами в мембранному електродному блоці (MEA). На електроди наноситься твердий полімерний електроліт (SPE), наприклад, натрій. Цей високопористий матеріал полегшує проходження струму від біполярних пластин до електрода. Він також забезпечує транспортування води до електрода і відведення газів продукту від електрода.

Залежно від конструкції штабеля, на біполярних пластинах вигравірувані канали, які підводять воду до електрода і відводять гази продукту. Крім того, ці канали забезпечують рівномірний розподіл густини струму в електроліті.

Вода подається на анод, де в анодній реакції (11) вона розщеплюється на атомарний кисень і два протони за допомогою прикладеної напруги розкладання води



Кисень з'єднується з молекулами O_2 , а потім вивільняється. Протони проходять через мембрану до катода, де в катодній реакції (12) вони реагують з двома електронами, утворюючи водень



Це означає, що у воду занурюється лише анодна частина напівелемента. Теоретично, катодний напівелемент містить виключно водень. На практиці вологість у цій півкомірці залишається високою.

Паливні елементи використовують зворотний електроліз. На рисунку 5 показана базова конструкція паливного елемента. Паливний елемент містить два пористих (газопроникних), каталітично активних електроди. Каталітичний означає, що характеристики матеріалу електродів зменшують енергію активації реакції. Чистий водень або продукти згоряння, що містять водень, протікають навколо анода, викликаючи вивільнення електронів (окислення). Окислювачем на катоді є чистий кисень O_2 або повітря (близько 21%

O₂ за об'ємом). Електроди розділені електролітом для контролю швидкості хімічної реакції. Електроліт є газопроникним та іонопровідним, щоб запобігти змішуванню двох газів. Це може призвести до киснево-водневої реакції та вибухового виділення енергії.

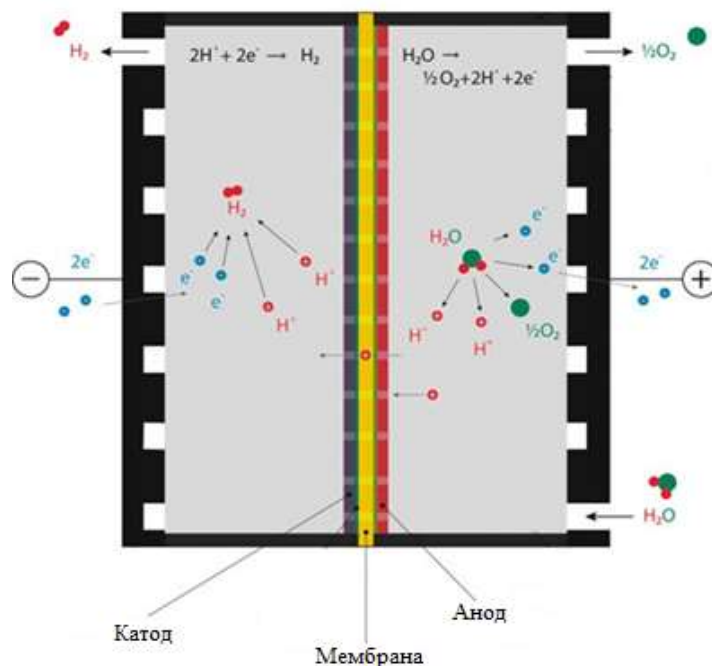


Рисунок 4 – Принцип дії мембранного електролізу

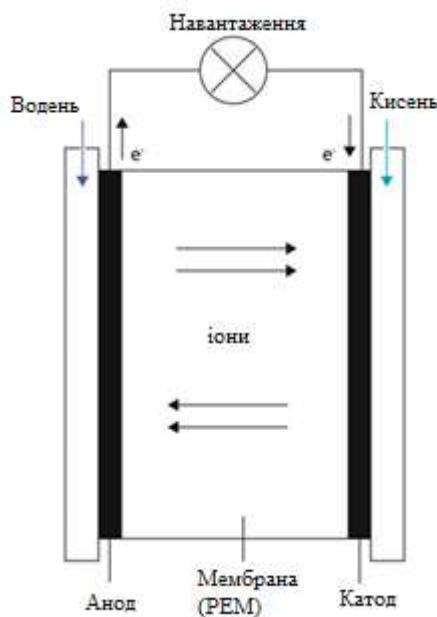


Рисунок 5 – Конструкція паливного елемента

Спочатку водень на аноді віддає свої електрони, іонізуючись в іони гідрокарбонату. Потім вивільнені електрони рухаються по електричному провіднику від анода до катода, де струм може бути використаний навантаженням. Досягнувши катода, електрони розщеплюють молекули кисню на іони O₂. Залежно від типу паливного елемента, іони O₂ потім або рухаються через електроліт до анода і реагують там з іонами гідрокарбонату з утворенням води (H₂O), або навпаки.

Окремі паливні елементи зустрічаються рідко. Зазвичай кілька елементів з'єднуються послідовно в стек, як у випадку з електролітними елементами. Окремі елементи зазвичай з'єднуються в біполярний стек. Це означає, що кожна стінка, яка розділяє елементи, функціонує з одного боку як катод, а з іншого - як анод.

Основними критеріями, які відрізняють різні типи паливних елементів, є електроліт, газ згоряння і робоча температура.

Найпоширенішими на сьогоднішній день є паливні елементи РЕМ, вони будуть розглянуті тут більш детально. Електроліт - це протонопровідна мембрана на основі полімеру. Електродами зазвичай є вуглецеві або металеві носії, покриті платиновим каталізатором. Перевагою таких паливних елементів є те, що в них можна подавати повітря замість кисню. Крім того, мембранні паливні елементи мають високу щільність енергії. Проблеми з цим видом палива включають короткий термін служби мембрани і пошук відповідного матеріалу для електродів.

У паливному елементі РЕМ відбуваються наступні реакції:

а) анод (окислення)



б) катод (відновлення)



в) завершення (окислювально-відновна реакція)



Перевага паливних елементів над киснево-водневою реакцією полягає в тому, що енергія безпосередньо перетворюється з енергії хімічних зв'язків в електричну без попереднього виробництва теплової енергії. В результаті елементи мають низький рівень шуму, низький рівень викидів і високу ефективність навіть при частковому навантаженні. Вони не залежать від ефективності перетворення енергії, що відповідає межі Карно, і не виробляють велику кількість відпрацьованого тепла, як при традиційному виробництві електроенергії. Перетворення обмежується лише зміною вільної ентальпії ΔG_R (або потенціалу Гіббса). Це означає, що теоретична максимальна енергія, яку можна перетворити, становить (15):

$$\Delta G_R = \Delta H_R - T \cdot \Delta S, \quad (15)$$

де ентальпія утворення ΔH_R при 25 °C і 1 бар становить -285.83 кДж/моль, що еквівалентно GCV H_2 водню. Як наслідок (16):

$$\Delta G_R = -237.13 \frac{kJ}{mol} \quad (16)$$

Оскільки фактично перетворена енергія є нижчою через зміну ентропії, досяжна напруга комірки становить U_{rev} на рівні 1.229 В. Це нижче теоретично досяжної максимальної напруги $U_{max} = 1.481$ В. Термодинамічна ефективність визначається співвідношенням між цими двома величинами (17):

$$\begin{aligned} U_{rev} &= -\frac{\Delta G_R}{z \cdot F}, \\ U_{max} &= -\frac{\Delta H_R}{z \cdot F}, \\ \eta_{rev} &= \frac{|\Delta G_R|}{|\Delta H_R|} = \frac{U_{rev}}{U_{max}} = 0.83 = 83\%, \end{aligned} \quad (17)$$

де z - кількість електронів на молекулу (z (H_2) = 2),

F - 96,485 А с/моль як стала Фарадея.

У таблиці 2 наведені технічні характеристики паливних елементів H_2/O_2 з рідким і газоподібним продуктом. Як і у випадку електролізу води, пара є значно ефективнішою за воду.

Характеристична крива густини струму-напруги для паливного елемента демонструє максимальну U_{max} та реверсивну U_{rev} напруги. У реальному паливному елементі виникають додаткові ефекти, які знижують напругу елемента або спричиняють втрати. Втрати напруги складаються з втрат спричинених проходженням електронів через межу між електродом та електролітом, омичного падіння напруги, спричиненого внутрішніми опорами електрода та провідника та дифузійних втрат.

5. Експериментальні дослідження принципу роботи паливного елемента та визначення його ефективності

На рис. 6 наведено схему експериментальної установки для виробництва водню. Вона складається з електролізера з ємностями для води, накопичувача для зберігання водню, мембранних клапанів і запірної арматури.

Для роботи установки використовується дистильована вода, живлення електролізера здійснюється постійним джерелом напруги 1,9 В, струмом 200 мА. Для зберігання водню було розроблено накопичувач,

заснований на принципі витіснення води в нижню ємність при надходженні водню у верхню ємність. Фіксація показників напруги і струму електролізера, здійснюється мультиметрами UT61+ підключеними до комп'ютера з програмним забезпеченням UNIT. Вигляд зібраної установки наведений на рис. 7. Після подачі живлення на електролізер, спостерігається активне виділення водню і кисню, водень при цьому надходить в накопичувач, а кисень вивільняється в навколишнє середовище.

Процес виробництва водню триває до тих пір поки вода в верхній ємності накопичувача не перетече в нижню ємність.

Таблиця 2. Технічні характеристики паливного елемента H_2/O_2 з рідким і газоподібним продуктом

	Двофазна система (вода в рідкому вигляді, 25°C, 1 бар)	Газофазна реакція (вода в газоподібному стані, 100 °C, 1 бар)
Зміна ентальпії/потенціалу Гіббса ΔG , кДж/моль	237,13	228,57
Ентальпія зв'язку ΔH , кДж/моль	285,83	241,82
Термодинамічна ефективність, %	83.0	94.5
Оборотна напруга комірки, В	1.23	1.18
Термонеутральна напруга комірки, В	1.48	1.25

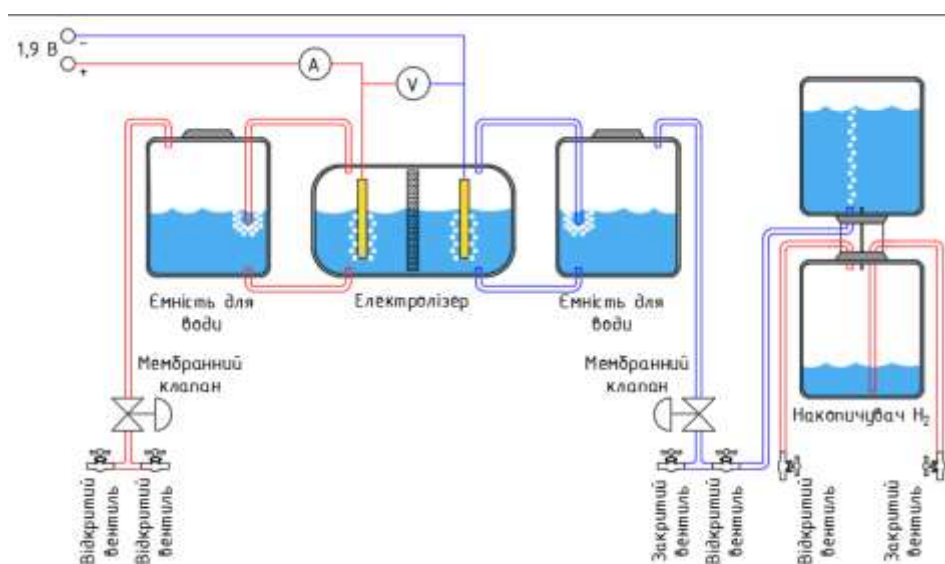


Рисунок 6 – Схема експериментальної установки для виробництва водню та електроенергії

Для оцінки ефективності установки, яка перетворює електричну енергію в водень через електроліз, а потім використовує отриманий водень для виробництва електричної енергії через паливний елемент, необхідно розглянути два основні етапи процесу:

- перетворення електричної енергії в водень (електроліз);
- перетворення водню в електричну енергію (паливний елемент).

Вихідні дані:

- час виробництва водню: 3 години;
- кількість виробленого водню: 300 мл (0,3 л);
- електрична енергія, витрачена на виробництво водню: 1,28 Вт·год;
- час роботи паливного елемента: 11 годин;
- електрична енергія, отримана від водню: 0,062 Вт·год.

Показники, що стосуються роботи електролізера і паливного елемента, фіксувалися за допомогою вимірювальних приладів. Це дозволило отримати точні дані для подальшого аналізу і розрахунку ефективності.

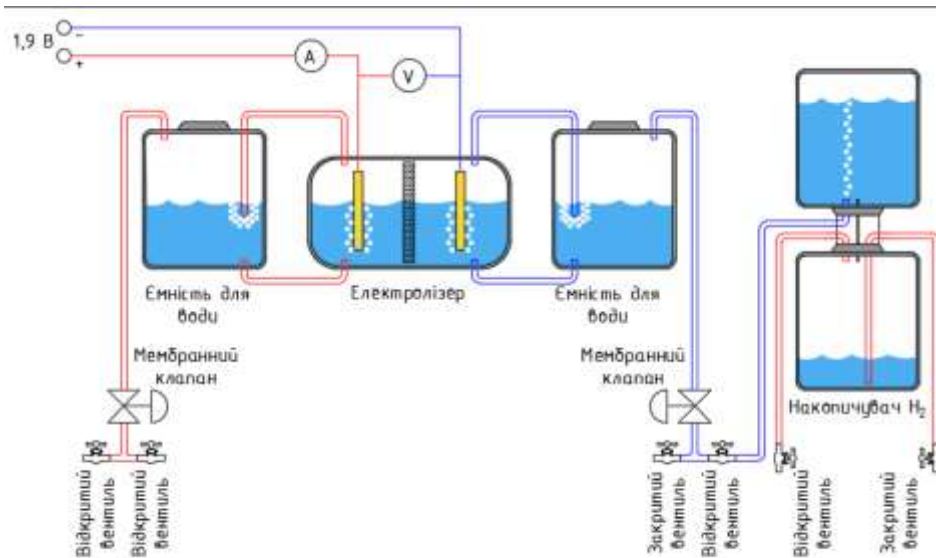


Рисунок 6 – Схема експериментальної установки для виробництва водню та електроенергії

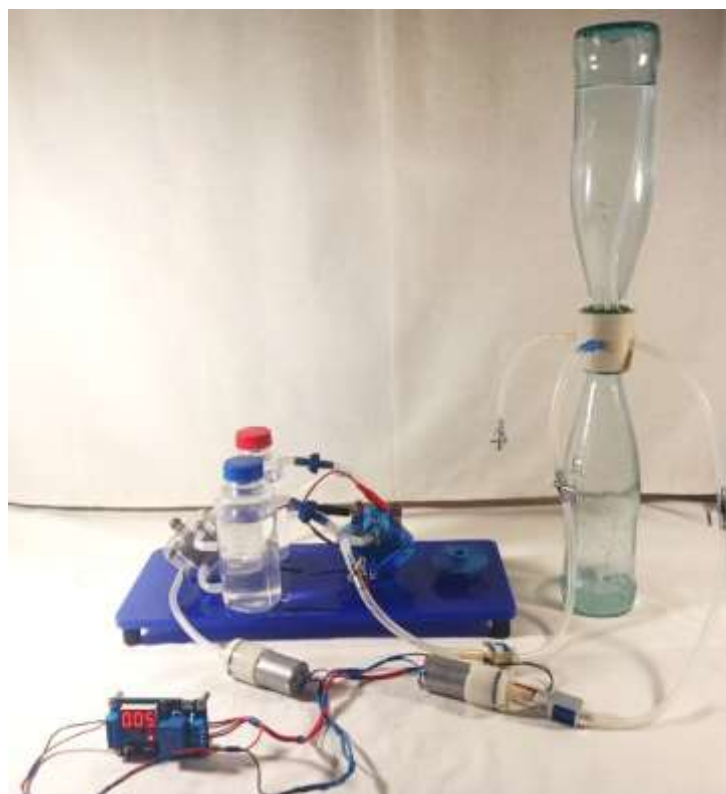


Рисунок 7 – Вигляд установки для виробництва водню та електроенергії

Етап 1. Перетворення електричної енергії в водень (електроліз)

Електролізером було спожито 1,28 Вт·год електричної енергії для виробництва 300 мл водню за 3 години. Вимірювальні прилади, дозволяли точно фіксувати всі параметри роботи електролізера, такі як споживана потужність, напруга та струм. Це дало змогу отримати точні дані, що дозволяють оцінити ефективність перетворення електричної енергії в водень.

Етап 2. Перетворення водню в електричну енергію (паливний елемент)

Після отримання водню, він використовувався в паливному елементі для виробництва електричної енергії. Протягом 11 годин було отримано 0,062 Вт·год електричної енергії. Операції з паливним елементом також фіксувалися вимірювальними приладами, підключеними до програмного забезпечення, що дозволяє відстежувати всі параметри роботи паливного елемента, такі як напруга, струм та вихідна потужність.

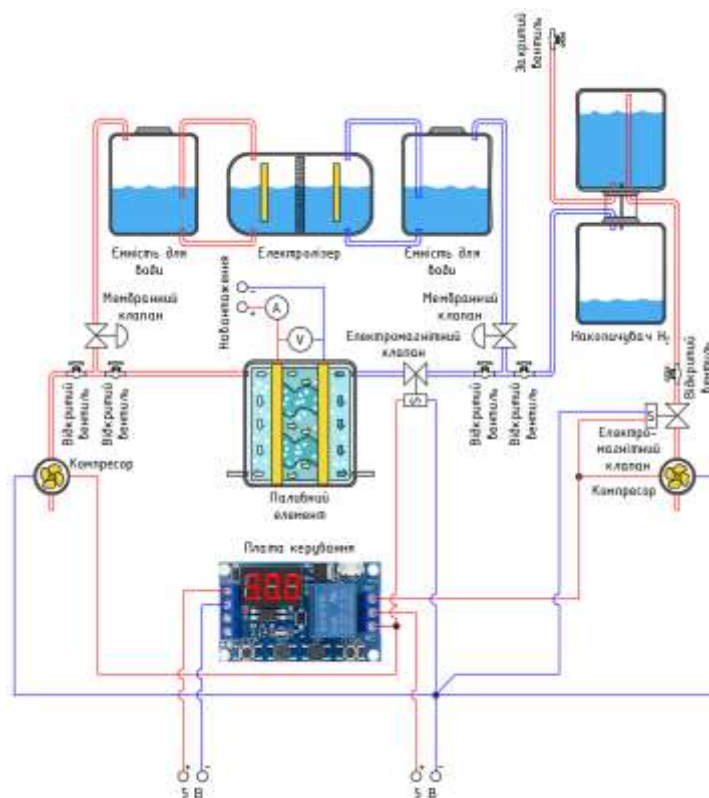


Рисунок 8 – Удосконалена схема експериментальної установки для виробництва водню та електроенергії

Для оцінки ефективності перетворення електричної енергії на водень, треба порівняти витрачену енергію на виробництво водню з енергією, яку можна отримати від водню. Однак, для цього потрібно враховувати теплоту згоряння водню, яка в даному випадку не була зазначена, тому ми використовуємо дані про спожиту енергію для загальної оцінки ефективності.

Витрачено на виробництво водню: 1,28 Вт·год

Вироблено водню: 300 мл (0,3 л)

Ефективність паливного елемента можна оцінити за формулою

$$\eta_{\text{п.ел.}} = \frac{W_{\text{вир.ел.ен.}}}{W_{\text{вит.ел.ен.}}} \cdot 100\% = \frac{0,062 \text{ Вт} \cdot \text{год}}{1,28 \text{ Вт} \cdot \text{год}} \cdot 100\% = 4,84\%, \quad (18)$$

де $W_{\text{вир.ел.ен.}}$ - кількість електричної енергії, отриманої від водню;

$W_{\text{вит.ел.ен.}}$ - кількість електричної енергії, витраченої на виробництво водню.

Таким чином, ефективність паливного елемента склала 4,84%, що вказує на значні енергетичні втрати в процесі перетворення водню в електричну енергію.

Використана експериментальна установка наразі має багато напрямків підвищення ефективності її роботи, через її наявну недосконалість. Промислові водневі установки мають ефективність на рівні 50% в порівнянні з розглянутою установкою. На поточному етапі можна виділити наступні способи її удосконалення:

- покращення конструкції електролізера і паливного елемента;
- застосування нових матеріалів електродів;
- впровадження системи очистки водню;
- повне використання водню у паливному елементі;
- удосконалення системи подачі водню.
- масштабування установки.

Висновки.

Аналіз сучасних тенденцій у водневій енергетиці демонструє значний інтерес до водню як екологічно чистого енергоносія, особливо у довгостроковій перспективі. Основні виклики, пов'язані з його широким впровадженням, включають високу енергоємність виробництва, залежність від ископного палива та значні інвестиційні витрати на інфраструктуру. Перспективним напрямком є електроліз води у поєднанні

з відновлюваними джерелами енергії, який забезпечує мінімальні викиди та сприяє декарбонізації промисловості. Попри значний прогрес у технологіях електролізу, їх економічна ефективність залишається головним бар'єром для масштабного впровадження. Для України розвиток водневої енергетики є перспективним напрямком, особливо у поєднанні з потужним потенціалом відновлюваної енергетики. Впровадження водневих технологій може сприяти зниженню викидів парникових газів, підвищенню енергетичної незалежності та залученню інвестицій у сучасну енергетичну інфраструктуру.

Експериментальне дослідження ефективності накопичення та використання водню на основі електролізера та паливного елемента підтвердило, що електролітичні технології є перспективним засобом зберігання та перетворення енергії.

Показано, що електроліз води залишається основним способом отримання водню, а сучасні методи електролізу — лужний, мембранний PEMEL та високотемпературний HTES — демонструють високу ефективність і можуть бути інтегровані в енергетичні системи.

Енергетична ефективність процесу значною мірою залежить від температури та електрохімічних параметрів. Дослідження підтверджують, що термодинамічна ефективність газозфазної реакції може досягати 94,5% при підвищених температурах, а оптимальний температурний діапазон для електролізу води становить 373–400 К.

Кінетичні ефекти та падіння напруги мають вирішальне значення для продуктивності електролізерів. Зокрема, перенапруги на електродах, омичні втрати та утворення газових бульбашок між електродами можуть суттєво знижувати ефективність процесу. Для мінімізації втрат доцільно використовувати газопроникні електроди та підвищувати температуру електролізу.

В роботі підкреслено перспективність мембранного електролізу (PEM) як технології виробництва водню. Завдяки протонобмінній мембрані він забезпечує високу швидкість реакції та може працювати у відносно компактних системах, що робить його придатним для широкого впровадження в енергетиці.

Паливні елементи на основі протонобмінної мембрани (PEMFC) демонструють ефективне перетворення водню в електроенергію. Це відкриває перспективи для їхнього застосування як у стаціонарних енергосистемах, так і в транспортному секторі.

Список використаної літератури

1. Перспективи та проблемні питання становлення і розвитку водневої енергетики в Україні / Я. В. Дорошенко, М. О. Карпаш, С. М. Стецюк [та ін.] // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. - 2022. - № 1. - С. 7-33.
2. Миськів Г. В., Іваницький Р. Я. Зелений водень як основа для водневої економіки. Наукові інновації та передові технології. 2024. № 1(29), С. 508-519. [https://doi.org/10.52058/2786-5274-2024-1\(29\)-508-519](https://doi.org/10.52058/2786-5274-2024-1(29)-508-519)
3. Akinyele D., Olabode E., Amole A. Review of fuel Cell Technologies and Applications for Sustainable Microgrid Systems. *Inventions*. 2020. V. 5, No 42. PP35. DOI: <https://doi.org/10.3390/inventions5030042>
4. Andre L. P., James H. and Colin M. Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies. 2001. P. 171-181.
5. Hydrogen fuel cell technology for the sustainable future of stationary applications. *Energies* / Felseghi R.-A. et al. 2019. V. 12, No 23. PP. 4593. DOI: <https://doi.org/10.3390/en12234593>
6. Andrews J. and Shabani B. Where Does Hydrogen Fit in a Sustainable Energy Economy? *Procedia Engineering*. 2012. V. 49. P. 15-25.
7. Fan L., Tu Z., Chan S.H. Recent Development of Hydrogen and Fuel Cell Technologies: A review. *Energy Reports*. 2021. V. 7. P. 8421 – 8446. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.08.003>
8. Sterner M., Stadler I. Handbook of Energy Storage. Springer-Verlag GmbH Germany, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-55504-0>

D. Bosyi¹, Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0000-0003-1818-2490
O. Zhevzyk¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-8938-9301
Ye. Naumov¹, student, ORCID 0009-0001-8968-8942
A. Antonov¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0001-5701-6087
I. Potapchuk¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-5985-1040
I. Kondratiuk², PhD student, ORCID 0009-0004-2174-6298
¹Ukrainian State University of Science and Technologies
²State University Of Trade And Economics

EXPERIMENTAL STUDY OF HYDROGEN STORAGE AND UTILIZATION EFFICIENCY BASED ON AN ELECTROLYZER AND FUEL CELL

The purpose of the article is to analyze the efficiency of water electrolysis as a method for hydrogen production and storage, as well as to assess the prospects of its use in fuel cells for energy storage and conversion.

Three main electrolysis methods are considered: alkaline, membrane (PEMEL), and high-temperature (HTES). The research confirms that the efficiency of the process largely depends on temperature and electrochemical parameters, with the optimal temperature range for water electrolysis being 373–400 K. Special attention is given to kinetic factors such as electrode overpotentials, ohmic losses, and the formation of gas bubbles, which can reduce the performance of electrolyzers.

PEM electrolysis is identified as one of the promising hydrogen production technologies due to its high reaction rate and the possibility of integration into compact systems. In addition, the efficiency of proton exchange membrane (PEMFC)-based fuel cells is explored, as they can be used in both mobile and stationary energy systems.

The conclusions of the work confirm the feasibility of further development of electrolytic technologies for hydrogen production, opening opportunities for their implementation in renewable energy and transportation sectors.

Keywords: *Water Electrolysis, Hydrogen Technologies, PEM Electrolysis, Fuel Cells, Energy Storage, Energy Efficiency.*

References

1. Перспективи та проблемні питання становлення і розвитку водневої енергетики в Україні / Я. В. Дорошенко, М. О. Карпаш, С. М. Стецюк [та ін.] // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. - 2022. - № 1. - С. 7-33.
2. Миськів Г. В., Іваницький Р. Я. Зелений водень як основа для водневої економіки. Наукові інновації та передові технології. 2024. № 1(29), С. 508-519. [https://doi.org/10.52058/2786-5274-2024-1\(29\)-508-519](https://doi.org/10.52058/2786-5274-2024-1(29)-508-519)
3. Akinyele D., Olabode E., Amole A. Review of fuel Cell Technologies and Applications for Sustainable Microgrid Systems. *Inventions*. 2020. V. 5, No 42. PP35. DOI: <https://doi.org/10.3390/inventions5030042>
4. Andre L. P., James H. and Colin M. Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies. 2001. P. 171-181.
5. Hydrogen fuel cell technology for the sustainable future of stationary applications. *Energies* / Felseghi R.-A. et al. 2019. V. 12, No 23. PP. 4593. DOI: <https://doi.org/10.3390/en12234593>
6. Andrews J. and Shabani B. Where Does Hydrogen Fit in a Sustainable Energy Economy? *Procedia Engineering*. 2012. V. 49. P. 15-25.
7. Fan L., Tu Z., Chan S.H. Recent Development of Hydrogen and Fuel Cell Technologies: A review. *Energy Reports*. 2021. V. 7. P. 8421 – 8446. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.08.003>
8. Sterner M., Stadler I. Handbook of Energy Storage. Springer-Verlag GmbH Germany, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-55504-0>

Надійшла: 04.04.2025
Received: 04.04.2025