МШНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Навчально-науковий інститут комп’ютерної фізики та енергетики

Кафедра фізики нетрадиційних енерготехнологій та екології

Пояснювальна записка

до дипломної роботи бакалавр

на тему:

Акумулювання енергії з використанням електролізера та паливної комірки в енергокомплексі на основі поновлювальних джерел енергії

Виконав: студент 4 курсу, групи НФ-42

Золотухін Денис Олександрович

Спеціальність

144 – Теплоенергетика

Освітня програма:

Моделювання енергетичних систем та енергоефективність

Керівник: к. ф.-м. н., доцент

Чорна Наталя Анатоліївна

Рецензент:

Харків – 2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Харківський національний університет імені В.Н.Каразіна

Навчально-науковий інститут комп'ютерної фізики та енергетики

Кафедра _____фізики нетрадиційних енерготехнологій та екології_____

Рівень вищої освіти (освітньо-кваліфікаційний рівень) бакалавр

Спеціальність 144 – Теплоенергетика

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ __ ___

підпис ініціали,прізвище

"____"_____20___року

З А В Д А Н Н Я

НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ (ПРОЕКТ)

Золотухіна Дениса Олександровича

(прізвище, ім'я, по батькові студента)

1. Тема роботи «Акумулювання енергії з використанням електролізера та паливної комірки в енергокомплексі на основі поновлювальних джерел енергії»,

керівник роботи канд. техн. наук, доцент Чорна Наталя Анатоліївна

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від "___"_____20__року №___

2. Строк подання студентом роботи_____

3. Перелік питань, які потрібно розробити: Обґрунтувати перспективи використання водню в світовій енергетиці в цілому і, в енергетичній системі України, зокрема; навести огляд існуючих типів електролізерів і паливних комірок; виконати аналіз існуючих в Україні систем отримання та акумулювання водню і генерування електроенергії; дослідити ефективність систем акумулювання енергії з використанням електролізера та паливної комірки в

енергокомплексі на основі поновлювальних джерел енергії та провести розрахунок автономної системи енергозабезпечення відокремленого споживача

4. План роботи

№ з/п	Назви етапів роботи
1	Обґрунтування перспектив використання водню в світовій енергетиці в цілому, і в енергетичній системі України, зокрема.
2	Огляд існуючих типів пристроїв для вироблення водню, зокрема, електролізерів і паливних комірок.
3	Аналіз існуючих в Україні систем отримання та акумулювання водню і генерування електроенергії.
4	Аналіз ефективності системи акумулювання енергії та перспектив її застосування
5	Розрахунок автономної системи енергозабезпечення відокремленого споживача
	Висновки

5. Дата видачі завдання _____

Студент _____ Золотухін Д.О.
підпис ініціали, прізвище

Керівник роботи _____ Чорна Н.А.
підпис ініціали, прізвище

Реферат

Золотухін Денис Олександрович «Акумулювання енергії з використанням електролізера та паливної комірки в енергокомплексі на основі поновлювальних джерел енергії» (випускна робота бакалавра). – Харків: ХНУ ім. В. Н. Каразіна, 2025 – 65 с.

Робота складається з вступу, трьох розділів, висновків; містить 20 рисунків, 13 таблиць, список використаних джерел з 37 найменувань.

На підставі проведеного аналізу встановлено, що електролізери типу PEM є найбільш придатними для автономних побутових систем, а паливні комірки типу PEMFC демонструють екологічність та здатність до роботи в динамічному режимі, що важливо для непостійних побутових навантажень. Проведений розрахунок енергоспоживання типового домогосподарства, що включає електроприлади (холодильник, комп'ютер, освітлення, бойлер, електроплита, телевізор, вентиляція, система безпеки тощо) дозволяє стверджувати, що воднева енергетика є життєздатним рішенням для автономного живлення приватних будинків.

Ключові слова: воднева енергетика, автономна система енергозабезпечення, електролізер, паливна комірка, поновлювані джерела енергії.

Abstract

Zolotukhin Denys Oleksandrovych "Energy storage using an electrolyzer and a fuel cell in an energy complex based on renewable energy sources" (bachelor's thesis), - Kharkiv: V.N. Karazin KhNU, 2025 - 65 p.

The work consists of an introduction, three chapters, and conclusions; it contains 20 figures, 13 tables, and a list of 37 references.

Based on the analysis, PEM-type electrolyzers are found to be most suitable for autonomous household systems. Additionally, PEMFC-type fuel cells exhibit environmental friendliness and can operate in dynamic mode, which is important for non-constant household loads. Calculating the energy consumption of a typical household, which includes electrical appliances such as refrigerators, computers, lighting, boilers, electric stoves, TVs, ventilation systems, security systems, etc., demonstrates that hydrogen energy is a viable solution for the autonomous power supply of private homes.

Keywords: hydrogen energy, autonomous energy supply system, electrolyzer, fuel cell, renewable energy sources.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ……..…..7
ВСТУП……...….8
РОЗДІЛ 1 ВОДЕНЬ ЯК АЛЬТЕРНАТИВНЕ ДЖЕРЕЛО ЕНЕРГІЇ .....……...…9
1.1 Перспективи використання водню в енергетиці …….……....9
1.2 Аналіз існуючих типів електролізерів …….....……..15
1.3 Аналіз існуючих паливних комірок.....……..30
РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ АКУМУЛЮВАННЯ ЕНЕРГІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ЕЛЕКТРОЛІЗЕРА ТА ПАЛИВНОЇ КОМІРКИ……...39
2.1. Існуючі системи отримання та акумулювання водню і генерування електроенергії…….…….39
2.2. Аналіз ефективності системи акумулювання енергії та перспективи її застосування……47
РОЗДІЛ 3 РОЗРАХУНОК АВТОНОМНОЇ СИСТЕМИ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СПОЖИВАЧА……...……...…53
3.1 Визначення кількості водню для забезпечення стабільної роботи паливної комірки в автономній системі енергозабезепечення споживача…….53
ВИСНОВКИ……...……...……60
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ……..…….62

Перелік скорочень та абревіатур

ВДЕ - відновлювальні джерела енергії

ПРМ - паровий риформінг метану

ПЕПОМ - паливні елементи з протонообмінною мембраною

ККД – коефіцієнт корисної дії

AWE - електроліз лужної води

PEM - електроліз на мембранах протонного обміну

SOE - електроліз твердого оксиду

AEM - електроліз на аніонообмінних мембранах

ПК - паливна комірка

PEMFC - паливні елементи з протонообмінною мембраною

SOFC - твердо оксидні паливні елементи

PAFC - паливні елементи на основі фосфорної кислоти

AFC - лужні паливні елементи

DMFC - паливні елементи прямого метанолу

МГ - металогідрид

ВСТУП

Воднева енергетика набуває все більшого значення як один із провідних напрямків сучасної енергетичної трансформації. Вона поєднує екологічність, ефективність та інноваційність, сприяючи зменшенню викидів парникових газів і переходу до сталої енергетики. Багато країн світу активно інвестують у розробку водневих технологій, що відкриває нові горизонти для цієї галузі. Крім того, розвиток цієї сфери сприяє створенню нових робочих місць та підвищенню енергетичної незалежності країн.

Існують різні методи виробництва водню, що відрізняються за ефективністю, собівартістю та екологічністю: електроліз води (розщеплення молекул води на водень і кисень під впливом електричного струму), реакції термохімічного розкладу (отримання водню з природного газу, нафти або біомаси), гібридні технології (поєднання кількох способів виробництва для підвищення ефективності та мінімізації впливу на довкілля), фотоелектрохімічне розщеплення води – передова технологія, що використовує сонячне світло для безпосереднього виробництва водню з води, що може стати проривним рішенням для енергетики майбутнього [1].

Основні переваги сучасної водневої енергетики: гнучкість у транспортуванні та зберіганні, оскільки водень може транспортуватися трубопроводами, зберігатися в рідкому або газоподібному стані, що робить його зручним для використання у різних галузях; при згорянні водню утворюється лише водяна пара, що сприяє зменшенню викидів парникових газів; водневі технології дозволяють значно підвищити ККД енергетичних систем і зменшити втрати енергії; водень може бути ефективним замінником вугілля та природного газу у виробництві сталі, цементу та хімічної промисловості, що сприятиме скороченню викидів CO_2.

РОЗДІЛ 1
ВОДЕНЬ ЯК АЛЬТЕРНАТИВНЕ ДЖЕРЕЛО ЕНЕРГІЇ
1.1. Перспективи використання водню в енергетиці

В наш час зростаюча потреба в скороченні викидів парникових газів і залежність від викопного палива активізували пошук альтернативних джерел енергії. Водень з його високими густиною енергії і потенціалом для виробництва енергії без викидів є багатообіцяючим кандидатом. На відміну від традиційного викопного палива, водень можна виробляти з різноманітних поновлюваних джерел, що робить його привабливим варіантом для досягнення сталого енергетичного майбутнього. Його універсальність забезпечує можливості застосовування в багатьох секторах, включаючи транспорт, промисловість і виробництво електричної енергії [2]. Дослідження водневої енергетики датуються початком 19 століття з відкриттям електролізу води [3]. У 20 столітті відбувся значний прогрес, особливо на початку освоєння космосу, коли водневі паливні елементи приводили в дію космічні кораблі [4]. В останні десятиліття відновлення інтересу до водню пов'язане з гострою необхідністю пом'якшення кліматичних змін [5]. Рисунок 1 ілюструє хронологію розвитку водневої енергетики.

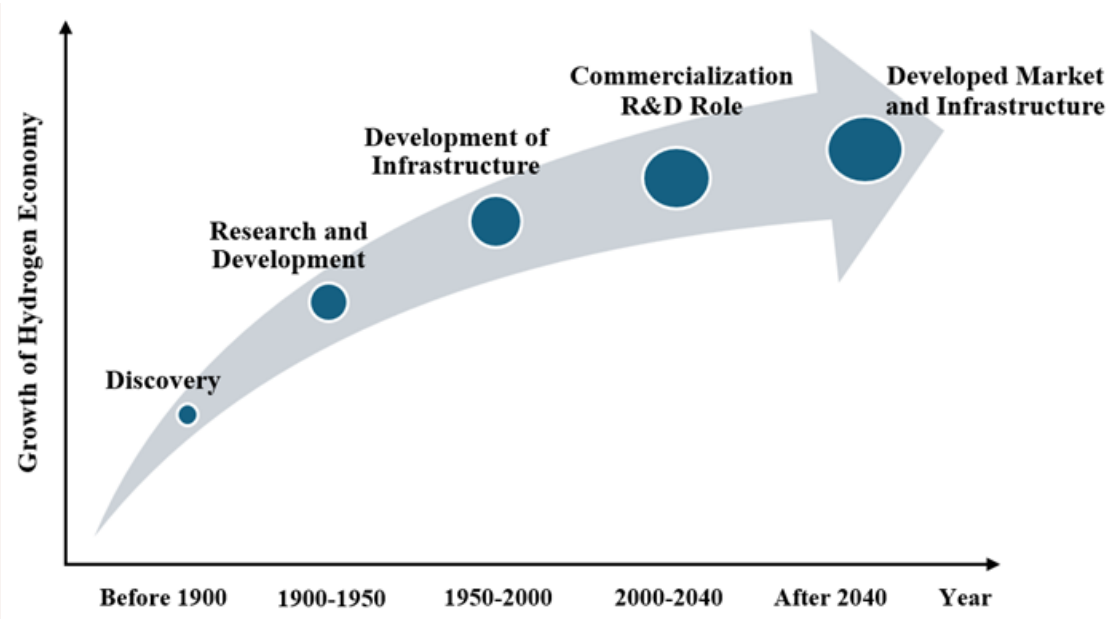


Рис. 1. Хронологія розвитку водневої енергетики [5].

Хронологія висвітлює ключові фази в еволюції водневої енергетики. Фаза відкриттів до 1900 року заклала фундаментальне усвідомлення людством того, що водень є потенційним джерелом енергії. Після цього настав період інтенсивних досліджень і розробок приблизно з 1900 по 1950 рік, протягом якого вчені та інженери досліджували фундаментальні властивості та потенційні можливості застосування водню. Друга половина 20-го століття характеризується значними кроками в розвитку інфраструктури виробництва, зберігання та розподілу водню, створюючи основу для більш широкого його використання у якості джерела енергії. Починаючи з 2000-х років і приблизно до 2040-х зусилля з комерціалізації та науково-дослідних розробок переважно зосереджені на вдосконаленні водневих технологій, щоб зробити їх більш ефективними та рентабельними. У цей період активно запроваджується інтеграція водню в різноманітні промислові та транспортні програми. Майбутня фаза, після 2040-х років, передбачає повністю розвинений ринок водню та інфраструктуру, що дозволить широко використовувати водень як основне джерело енергії. Наведений на рис. 1 графік підкреслює безперервний прогрес і зростаючу важливість водню в глобальному енергетичному ландшафті, підкреслюючи його потенціал відігравати вирішальну роль у досягненні цілей сталого розвитку енергії та скороченні викидів вуглецю в усьому світі.

Для отримання водню використовують ряд основних методів, кожен із яких характеризується як певними перевагами, так і проблемами, що потребують розв’язання:

Електроліз: - розщеплення води на водень і кисень за допомогою електроенергії, переважно з відновлюваних джерел [6]. Останні досягнення зосереджені на підвищенні ефективності та зниженні вартості процесу електролізу [7].

Паровий риформінг метану (ПРМ) - розвинена технологія, що передбачає реакцію метану з парою для отримання водню [8]. Цей метод наразі є найбільш

розповсюдженим - на нього припадає близько 48% світового виробництва водню [9]. Однак з ним пов'язані значні викиди CO_2 [10].

Біологічні технології - використання мікроорганізмів для виробництва водню за допомогою біофотолізу або «темного бродіння» [11]. Ці методи все ще знаходяться на експериментальній стадії, але є доволі перспективними для сталого виробництва водню [12].

Новітні технології, включаючи сонячні та термохімічні процеси, що ґрунтуються на використанні відновлюваних джерел енергії для виробництва водню [13].

У таблиці 1 наведено порівняльний огляд основних технологій виробництва водню, включаючи електроліз, ПРМ, біологічні процеси та технології з використання фотовольтаїки.

Таблиця 1: Порівняння технологій виробництва водню [7-13].

Технологія	**ККД (%)**
Електроліз (з сонячним/вітровим ВДЕ)	60-70
Паровий риформінг метану (ПРМ)	65-75
Біологічні технології	40-50
Технології на сонячних батареях	20-40

З цієї таблиці можна зробити висновок, що ПРМ виділяється як найбільш ефективний і економічно доцільний метод, доступний на даний момент, незважаючи на високі викиди CO_2. Метод електролізу характеризується помірною ефективністю і вартістю, а також, меншим потенціалом негативного впливу на навколишнє середовище, якщо використовувати енергію з відновлюваних джерел, таких як сонце чи вітер. Біологічні технології та новітні технології на сонячних батареях хоча і є менш ефективними та більш витратними, залишаються такими технологіями, що розвиваються, і мають значний потенціал для сталого виробництва водню в майбутньому.

Для широкого використання водню у якості альтернативного джерела енергії критично важливими є його ефективне зберігання (акумулювання) і розподіл.

Серед основних способів акумулювання водню розрізняють зберігання у стисненому газоподібному стані, в рідкому стані та в твердо тільних пристроях на основі гідридів металів. Кожен з цих способів характеризується певними унікальними перевагами і технологічними особливостями [14]. Акумулювання у стані стисненого газу є найбільш простим способом, але супроводжується високим тиском [15]. Рідкий водень забезпечує вищу густину енергії, але потребує надзвичайно низьких температур [16]. Металогідридне акумулювання водню є найбільш безпечним, але характеризується найменшою питомою вагою [17].

Розвиток інфраструктури для ефективного та безпечного транспортування водню залишається актуальною проблемою [18]. Трубопроводи, трейлери з балонами високого тиску і танкери зі зрідженим воднем є одними із засобів, що активно вдосконалюються [19]. На даний час спостерігається суттєвий прогрес у розробці матеріалів і технологій спрямований на вирішення цих проблем, зокрема матеріалів для виготовлення ємностей великого об’єму, а також, технологій безпечного транспортування [20].

На рисунку 2 наведено перелік найпоширеніших способів і технологій акумулювання водню. Кожен із цих способів має свої переваги та обмеження, необхідні для розробки комплексної водневої інфраструктури, зокрема транспортної.

Воднева енергетика має різноманітне застосування в різних секторах економіки.

Паливні елементи – для енергозабезпечення транспортних засобів, портативних пристроїв і систем резервного живлення. Паливні елементи з протонообмінною мембраною широко використовуються завдяки їх високому ККД і низькій робочій температурі [21].

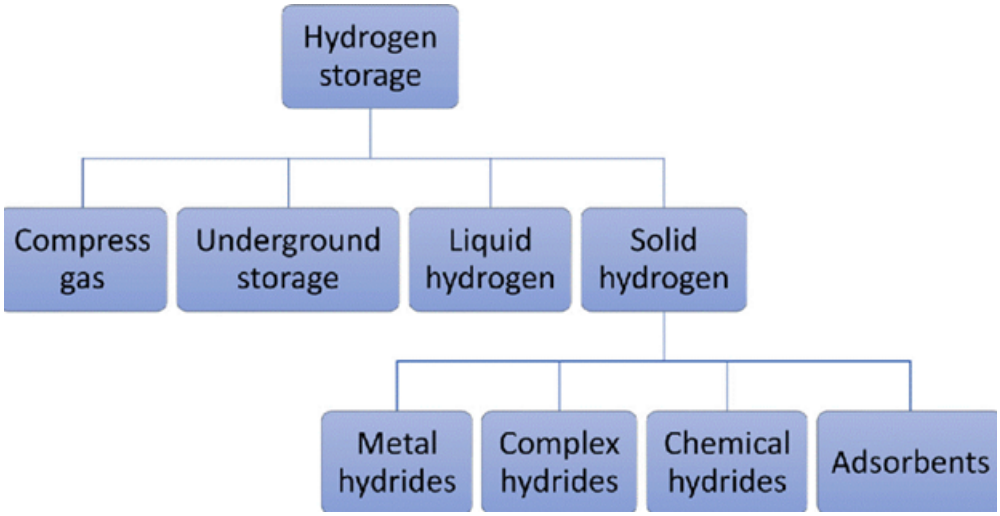


Рис. 2. Способи та технології акумулювання водню [20].

Промислове застосування – водень використовується на нафтопереробних заводах, при виробництві аміаку та в інших промислових процесах [22]. Водень також використовується при виробництві сталі та як відновник у хімічному виробництві [23].

Транспорт – транспортні засоби на водневих паливних елементах набувають популярності у якості екологічно чистої альтернативи традиційним транспортним засобам [24]. Великі автовиробники активно інвестують у водневу технологію, і на даний момент низка моделей вже є доступною на авторинку [25].

Виробництво електроенергії – водень можна використовувати в газових турбінах і централізованих системах комбінованого виробництва теплової і електричної енергії, забезпечуючи гнучкі та ефективні енергетичні рішення [26].

Таблиця 2 дозволяє підвести підсумок застосування водневої енергії, підкреслюючи її переваги і поточний стан.

Таблиця 2. Застосування водневої енергії і її переваги [21-26].

Застосування	**Переваги**	**Поточний стан**
Паливні елементи	Висока ефективність, низькі викиди	Комерційно доступні
Промислове застосування	Більш чисті виробничі процеси	Широко використовується

Транспорт	Нульові викиди, висока густина енергії	На етапі розвинення і зниження собівартості
Виробництво електроенергії	Гнучке, ефективне, підтримує поновлювані джерела енергії	На етапі від експериментального до комерційного

Водневі паливні елементи є комерційно доступними, здатними забезпечити високу ефективність з низькими викидами. Промислове застосування водню вже широко запроваджується, забезпечуючи екологічну чистоту виробничих процесів. У транспортному секторі водень забезпечує нульові викиди та високу густину енергії, хоча технології знаходяться на стадії розвитку. Програми для виробництва електроенергії варіюються від експериментальних до комерційних, мають високий потенціал для гнучких та ефективних енергетичних рішень з підтримкою інтеграції поновлюваних джерел енергії.

Актуальність проблеми застосування водневих технологій в різних галузях промисловості та енергетиці викликає підвищений інтерес в багатьох країнах світу, зокрема, і в Україні. Проект водневої стратегії України до 2050 року передбачає досягнення виробництва водню в Україні до 1,3 млн тонн у 2035 році та до 3 млн тонн у 2050-му [27]. До переваг водню, які обумовлюють розвиток водневої енергетики України відносять зручність у використанні, безмежність запасів у навколишньому середовищі, енергоефективність [28]. Також виробництво водню є вирішенням проблеми з надлишковим отриманням енергії з поновлюваних джерел та зручним способом балансування виробництва електроенергії в енергосистемі країни. До недоліків водневої енергетики відносять високу вартість виробництва водню на сучасному етапі, горючість і небезпечність при контакті з повітрям, значні технічні проблеми, які виникають при зберіганні та транспортуванні водню як енергоносія. Виділяють такі перспективні ефекти для економіки України як зменшення залежності від імпорту традиційних енергоносіїв, підвищення збалансованості роботи енергетичної системи країни, можливість змінити роль газотранспортної системи України для енергетичного

ринку Європи, створення нової експортної галузі за фінансової та технічної підтримки ЄС, створення внутрішнього ринку «зеленого» водню в країні та нових робочих місць.

Для вирішення енергоекологічних проблем України пропонується активне впровадження поновлюваних джерел енергії шляхом створення інноваційних сонячно-водневих заправних станцій. Ці станції, що базуються на передових технологіях, забезпечать екологічно чистим паливом – воднем – автомобільний транспорт .

При обговоренні перспектив водневих технологій в автономних енергосистемах на основі ВДЕ основна увага приділяється вирішенню проблем нестабільності поновлюваних джерел шляхом інтеграції технологій електролізу, металогідридного акумулювання водню та використання паливних елементів. Ці технології підвищують надійність енергопостачання, особливо у віддалених районах. Акцент зроблено на ефективних низькотемпературних паливних елементах (1–20 кВт) та безпечних металогідридних акумуляторах. Енергетичні системи, що містять такі пристрої, дозволяють зменшити екологічне навантаження і виключити необхідність використання компресорів завдяки умовам акумулювання водню за високих тисків. У зв’язку з цим доцільно провести аналіз існуючих типів електролізерів та навести огляд існуючих паливних комірок, що дозволить в подальшому обрати найбільш оптимальні варіанти при дослідженні ефективності системи акумулювання енергії в енергокомплексі на основі поновлювальних джерел енергії.

.

Принцип роботи електролізера

Одним з основних способів отримання водню є процес електролізу, який відбувається в спеціальному пристрої — електролізері. Суть процесу полягає в розкладанні молекул води (H_2O) на складові компоненти — водень (H_2) і кисень (O_2) — під дією електричного струму. При подачі напруги на електроди електролізера вода на аноді втрачає електрони, утворюючи кисень, тоді як на катоді відбувається відновлення — утворюється водень. Загальне рівняння реакції має вигляд:

$$\mathbf{2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2}$$

Процес електролізу є енергозатратним і потребує стабільного джерела електроенергії. Якщо енергія надходить із відновлюваних джерел (сонячної чи вітрової), отриманий водень вважається екологічно чистим, або «зеленим». Тип електролізера (лужний, PEM, SOE, AEM) визначає особливості процесу, температурний режим, ефективність і вартість обладнання. Усі ці фактори мають критичне значення при виборі технології для енергетичних систем на основі водню.

Етап	Опис процесу
1. Подавання води	В електролізер подається очищена вода (H_2O) як сировина.
2. Подача електроенергії	На анод і катод подається постійна електрична напруга.
3. Окиснення на аноді	На аноді вода розкладається з утворенням кисню (O_2), протонів (H^+) і електронів (e^-).
4. Рух електронів	Електрони проходять через зовнішнє коло до катода.
5. Відновлення на катоді	На катоді протони з’єднуються з електронами — утворюється водень (H_2).
6. Вихідні продукти	Результат процесу — водень (H_2) і кисень (O_2), що можуть використовуватись у паливних комірках або зберігатися.

1.2 Аналіз існуючих типів електролізерів

Порівняно з іншими методами отримання водню, електроліз відрізняється простотою технологічної схеми, можливістю ефективного використання поновлювальних джерел енергії, доступністю сировини і відносною легкістю обслуговування енергетичних установок. Істотним недоліком електрохімічного методу отримання водню є велика енергоємність процесу розкладання води [7].

У процесі електролізу води молекули води розщеплюються на основні компоненти: водень і кисень, за допомогою електроенергії. Якщо електроенергія надходить з відновлюваних джерел (наприклад, вітру або сонця), то говорять про вироблення зеленого водню. На сьогоднішній день існує кілька технологій, які можна використовувати для виробництва зеленого водню. Наведемо огляд чотирьох основних технологій електролізу води і проаналізуємо їх переваги та відмінності:

- Електроліз лужної води (AWE);
- Електроліз на мембранах протонного обміну (PEM);
- Електроліз твердого оксиду (SOE);
- Електроліз на аніонообмінних мембранах (AEM).

Усі типи електролізерів мають спільний принцип дії і конструкцію. Окремі секції електролізерів містять анод і катод, а також, діафрагму та мембрану або електроліт. Секції оточені біполярними пластинами та розподільниками електричного струму. Секції з'єднуються послідовно у модулі. Потужність модуля може варіюватися від 1 до 20 МВт.

Принцип електролізу залишається незмінним для всіх технологій. Однак технології відрізняються на основі різних фізичних, хімічних і електрохімічних аспектів.

Лужні електролізери (рис. 3, 4). Лужний електроліз є традиційною та комерційно доступною технологією, яка використовується переважно у промисловості виробництва добрив та хлору. Наразі на нього припадає майже дві

третини світової потужності електролізу [32]. Він працює під тиском до 3 МПа і використовує товсті мембрани та електроди на основі нікелю [33]. Хоча простий і відносно недорогий дизайн робить його найдешевшим типом електролізера, його товсті мембрани знижують ефективність до 70–80 %.

Електролізери з протонообмінною мембраною (PEM) (рис. 5, 6). Незважаючи на те, що дана технологія є выдносно молодою, електролізери з PEM становлять одну п’яту світової потужності [32]. PEM працюють під високим тиском завдяки використанню тонких мембран із перфторсульфонової кислоти (PFSA), що забезпечує ефективність до 80–90% [33]. PEM має компактну і просту конструкцію та ряд переваг в плані роботи з періодичними навантаженнями, тобто характеризується швидкою реакцією на зміну відновлюваної електроенергії [34]. Однак кисле середовище PFSA вимагає використання золотих і титанових електродів і таких металів, як платина, іридій і рутеній, як каталізаторів, що значно збільшує його вартість.

Електролізери з твердо оксидними електролізними елементами (SOEC) (рис. 7, 8) відрізняються тим, що вони використовують тепло для отримання водню з пари, і їх найкраще розміщувати там, де є джерело тепла (ядерні чи промислові установки). Вони працюють за високих температур (500–850 ℃) [34]. SOEC продемонстрували вищу ефективність, ніж інші типи електролізерів, однак, з іншого боку, такі електролізери практично не витримують змін навантаження. SOEC - технологія все ще знаходиться на демонстраційному рівні [32].

Електролізери з аніонообмінною мембраною (AEM) (рис. 9, 10) – електролізери AEM працюють за значно нижчих температур 50–60 ℃, в діапазоні тиску 0,1–3 МПа [33]. Вони поєднують менш суворі умови лужних електролізерів із простотою та високою ефективністю електролізерів PEM. Це найновіша технологія, яка наразі розгорнута на рівні окремих прототипів і лише декілька компаній її комерціалізують.

Технічні характеристики 4-х типів електролізерів наведені у таблиці 3.

Таблиця 3. Технічні характеристики існуючих типів електролізерів.

Тип електролізера	AWE (лужний)	PEM (протонно обмінний)	SOE (твердо оксидний)	AEM (аніонно обмінний)
Електроліт	водний розчин гідроксиду калію	мембрани протонного обміну (PFSAm)	ітрієм стабілізований цирконій (YSZ)	аніонообмінний іономер
Катод	нікель, молібено-нікелівий сплав	платина, платино-паладієвий сплав	нікель/ YSZ	нікель, сплави на основі нікелю
Анод	нікель, нікель-кобальтовий сплав	оксид рутенію, оксид ірідію	YSZ	оксиди нікелю, заліза, кобальту
Робоча температура (ºС)	60-80	50-80	500-850	50-60
Робочий тиск (10^5 Па)	30	70	1-25	1-30
Термін служби (тис год)	60-100	20-60	< 10	-
Стан готовності	Традиційний	Комерційний	Демонстраційний	На рівні прототипу
Вартість ($/кВт)	500-1400	1100-1800	2800-5600	-

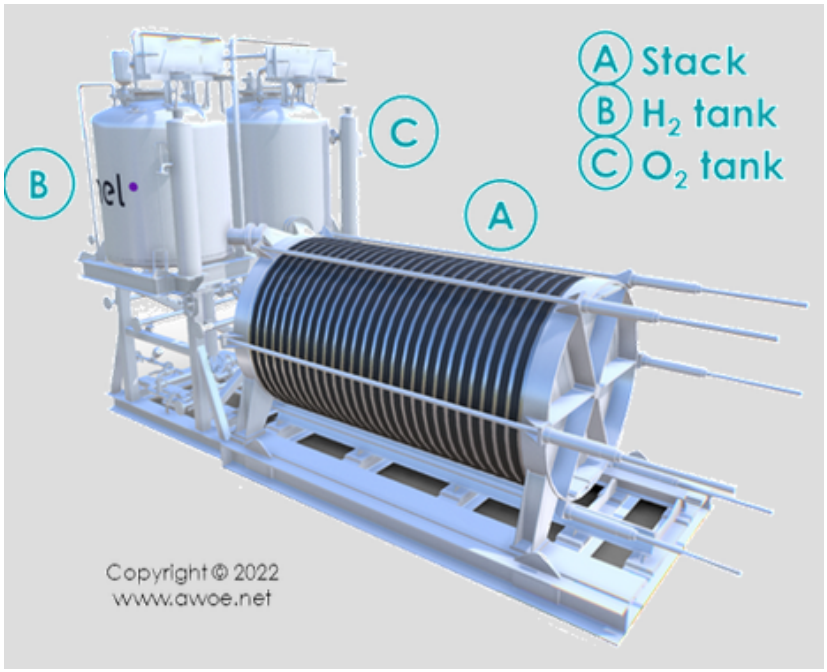


Рис. 3. Схема стаціонарного лужного електролізера.

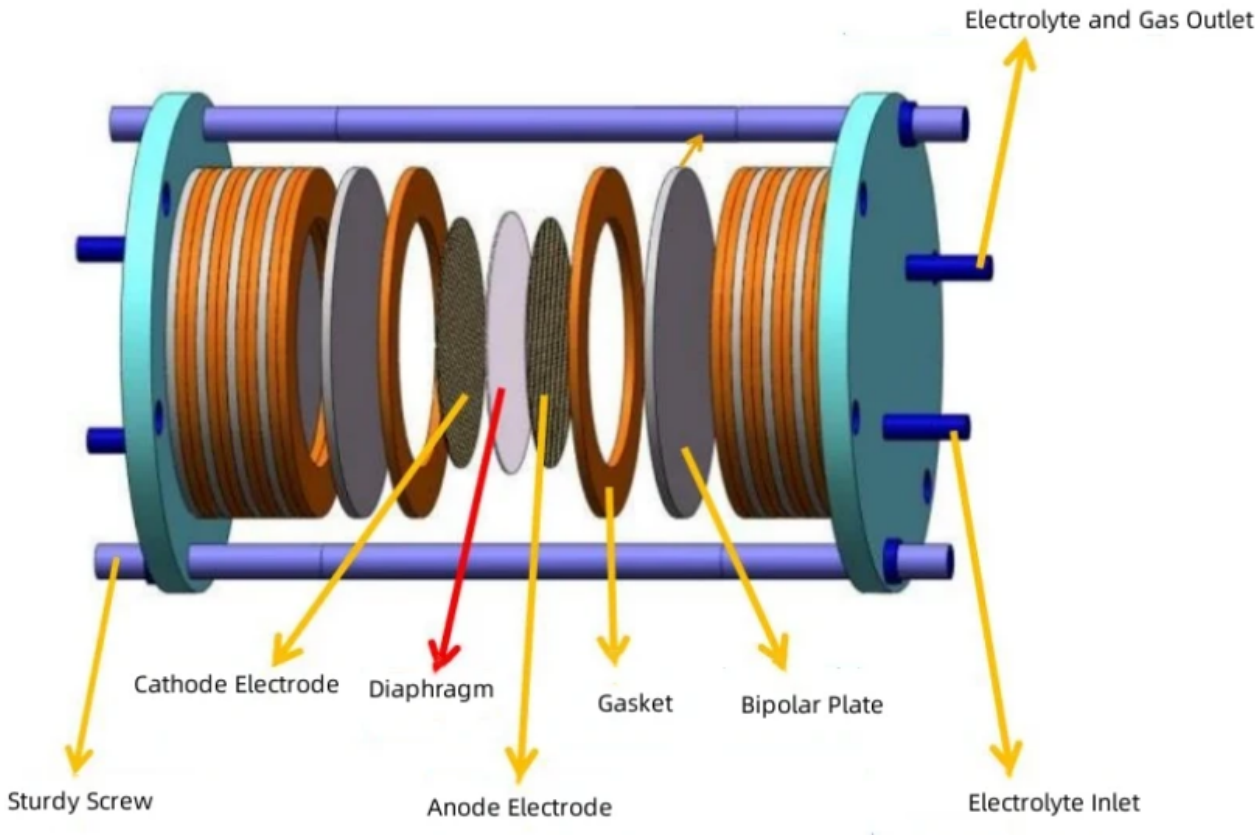


Рис. 4. Ключові компоненти лужного електролізера.

Лужні електролізери (AWE) є найбільш розповсюдженими. Це найстаріший і найбільш комерційно зрілий тип електролізера, що характеризується наступними: *Перевагами*: висока надійність, тривалий термін служби, низька вартість матеріалів і виробництва, відносно висока ефективність (70–80%).

Недоліками: відносно низька ефективність перетворення електроенергії у водень та великий об'єм рідкого електроліту, що потребує періодичного обслуговування; відносно повільна динаміка запуску і реагування на зміну навантаження; необхідність роботи під тиском для збільшення виходу; неможливість використання чистої води - потрібна спеціально підготовлена; ефективність може знижуватися при зміні режимів роботи або використанні електроенергії з нестабільних джерел, таких як вітрові та сонячні електростанції.

Застосуванням: переважно в промисловості (виробництво хімікатів, добрив), де важлива стабільна робота.

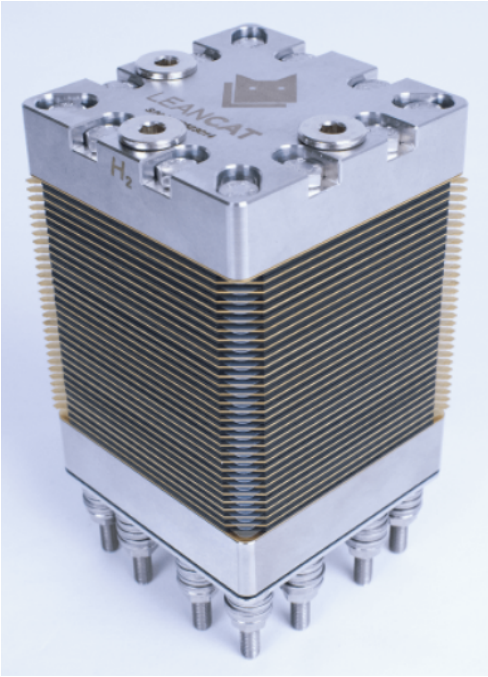


Рис. 5. Електролізер з протонообмінною мембраною PEM - 3 кВт (LCWE-25-30).

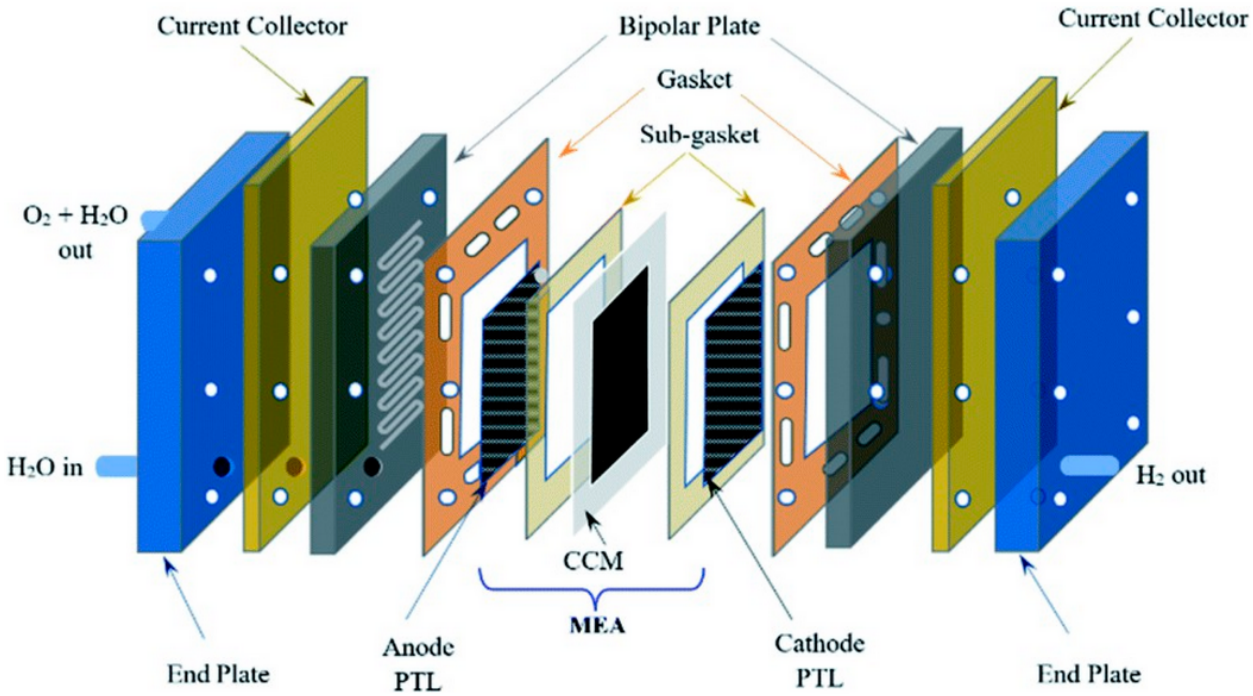


Рис. 6. Ключові компоненти електролізера з протонообмінною мембраною.

Електролізер з протон обмінною мембраною (PEM) використовує тверду полімерну мембрану як електроліт. Вода подається на анод, де розкладається на протони, електрони і кисень. Протони проходять крізь мембрану до катода, де з'єднуються з електронами й утворюють водень. Цей тип електролізерів характеризується наступними:

Перевагами: висока ефективність (80–90%), компактний розмір та висока густина потужності, висока чистота водню, швидкий запуск, хороша динаміка, можливість роботи на змінному навантаженні (добре підходить до відновлюваної енергетики).

Недоліками: висока вартість матеріалів (мембрана, каталізатори з платини або іридію), чутливість до чистоти води, обмежена довговічність у порівнянні з лужними.

Застосуванням: мобільні та стаціонарні джерела енергії, виробництво зеленого водню з ВДЕ (вітрові та сонячні електростанції).

Використання електролізерів з протон обмінною мембраною у складі енергетичних комплексів на основі відновлюваних джерел енергії дозволяє значно підвищити ефективність акумулювання енергії. Вони можуть працювати в парі з сонячними та вітровими електростанціями, що забезпечує можливість гнучкого регулювання енергоспоживання та збереження виробленого водню для подальшого використання.

Електролізери з твердо оксидними електролізними елементами (SOE) використовують твердий оксидний електроліт (зазвичай цирконій, стабілізований ітрієм). Процес проходить швидше, завдяки зменшенню енергетичного бар'єру при високих температурах (до 1000°C) . Цей тип електролізерів характеризується наступними:

Перевагами: вища ефективність у порівнянні з низькотемпературними типами електролізерів(може перевищувати 90% з урахуванням теплової енергії, див. прикл. на рис. 7); можливість використання промислових відходів тепла,

ефективна інтеграція з високотемпературними процесами, наприклад, в металургії або хімічній промисловості.

Недоліками: висока складність матеріалів і виробництва, потреба в тривалому прогріванні та повільному охолодженні, обмежена кількість комерційних розробок.

Застосуванням: промислові установки, енергокомплекси з надлишком тепла, перспективні великомасштабні рішення.



Рис. 7. Електролізер з твердо оксидними електролізними елементами - mPower 10 Cell Stack: на вироблення 1 $Нм^3$ водню витрачає 3,1 кВт/год електроенергії на відміну від PEM або лужних електролізерів, яким потрібно 4-5 кВт/год електроенергії.

Електролізери з твердими оксидами найчастіше використовуються в промислових умовах, де є доступ до високотемпературних джерел енергії, таких як теплові електростанції або металургійні комбінати. Їхня висока ефективність дозволяє значно знизити витрати на електроліз води, що робить їх привабливими для великих енергетичних комплексів.

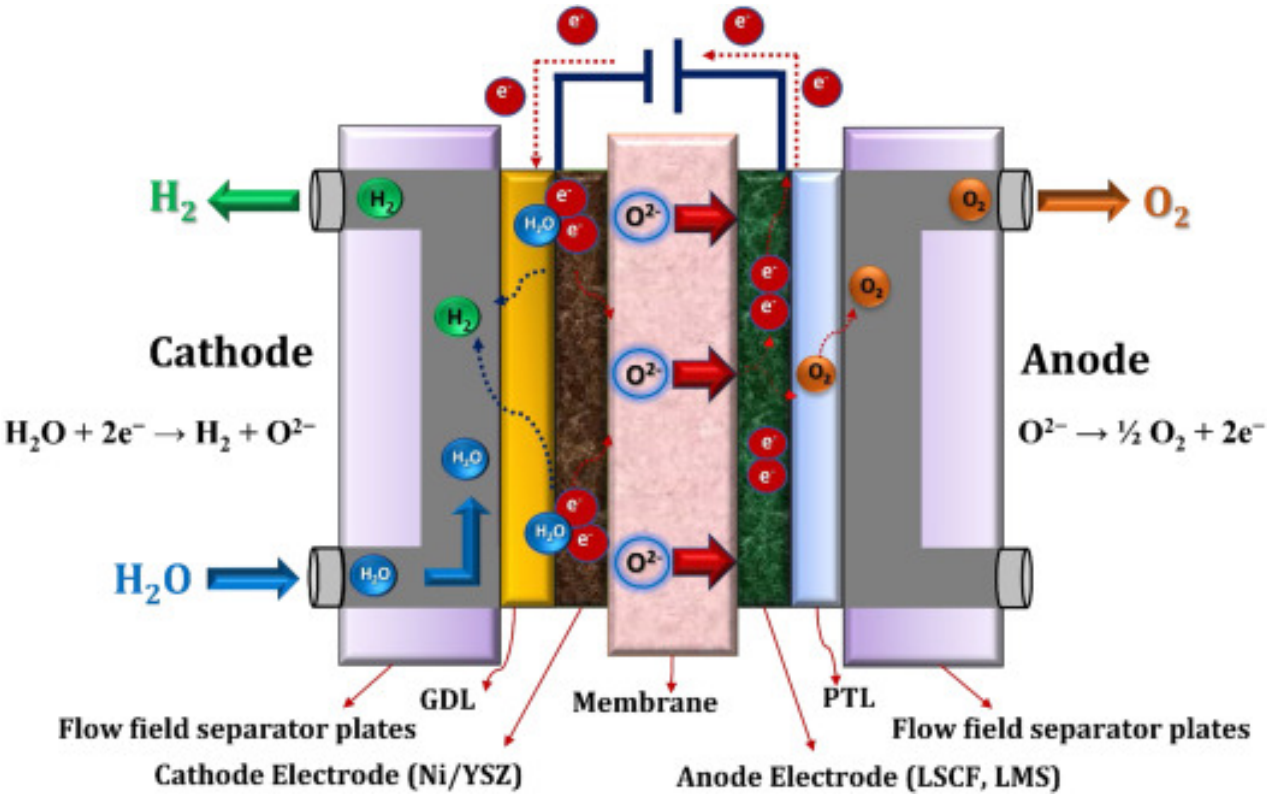


Рис. 8. Ключові процеси і компоненти електролізера з твердо оксидними електролізними елементами (SOE).

Електролізери з аніонообмінною мембраною (AEM) є прикладом новітньої технології, яка поєднує деякі переваги лужних і PEM електролізерів. Вона використовує тверду полімерну мембрану, яка проводить аніони (OH^-) замість протонів. Цей тип електролізерів характеризується наступними:

Перевагами: менш вартісні матеріали (може працювати без благородних металів), добре підходить для мініатюризації та побутового застосування, працює на чистій воді.

Недоліками: знаходиться ще на стадії активного дослідження та вдосконалення, менша довговічність і стабільність порівняно з PEM.

Застосуванням: побутове та комунально-житлове виробництво водню, перспективні мікросистеми.



Рис. 9. Електролізер з аніонообмінною мембраною (AEM)

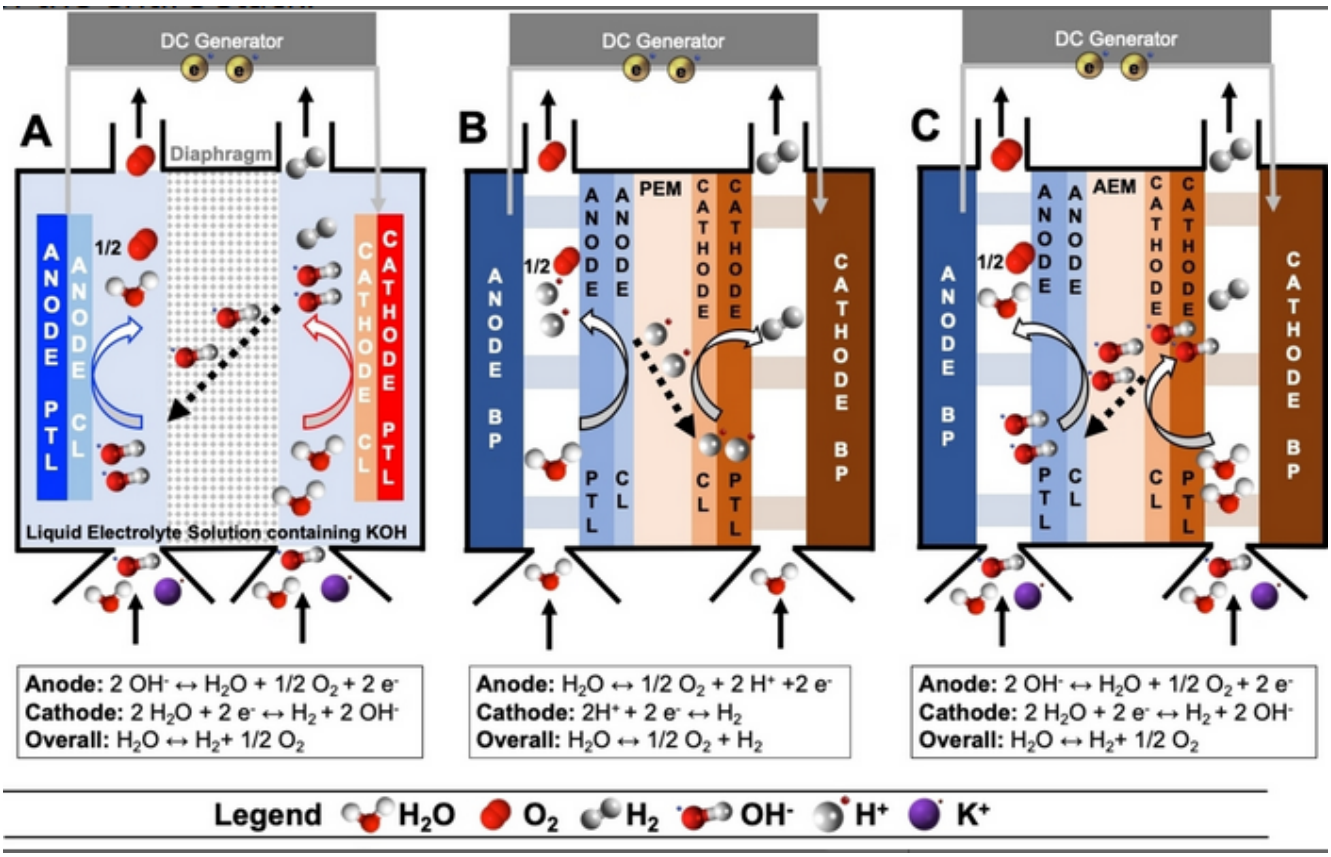


Рис. 10. Ключові процеси і компоненти електролізера з з аніонообмінною мембраною (AEM).

Електроліз на аніонообмінній мембрані (AEM) виділяється як передова технологія виробництва зеленого водню. У цьому процесі аніонообмінна мембрана полегшує проходження негативно заряджених гідроксильних іонів (OH-), одночасно перешкоджаючи позитивно зарядженим іонам (H+). Обмежені протони (H+) об'єднуються, утворюючи зелений газоподібний водень на стороні катода, тоді як іони гідроксилу (OH-) на стороні анода створюють воду та кисень.

Переваги електролізу AEM виходять за рамки традиційних технологій протонообмінної мембрани (PEM) і лужного електролізу. Електролізери AEM відрізняються своєю вражаючою здатністю виробляти високий тиск, що досягає 3 МПа, і генерувати надзвичайно чистий водень з чистотою 99,9%. Заслуговує на увагу той факт, що ці досягнення забезпечуються без використання дорогоцінних і дефіцитних металів, таких як іридій, або використання шкідливих і токсичних хімікатів, обмежених ланцюгом поставок. Завдяки ефективності, що перевищує 90%, електроліз AEM призводить до підвищення продуктивності водню, що, у свою чергу, знижує його вартість. Ця висока ефективність у поєднанні з уникненням токсичних хімікатів і дефіцитних металів робить електролізери AEM економічно ефективним і стійким вибором для виробництва екологічно чистого водню. Синергія виняткової ефективності, економічності та стійкості робить електроліз AEM найкращим варіантом у виробництві зеленого водню. Крім того, AEMs сприяє подовженню терміну служби електролізера, мінімізуючи потребу в ремонті та знижуючи загальні витрати на процес. Електролізери AEM мають компактну та масштабовану конструкцію, що робить їх ідеальними для проектів автономних енергетичних комплексів.

На підставі проведеного аналізу характеристики та особливості існуючих типів електролізерів можна систематизувати у формі порівняльних таблиць 4, 5.

Таблиця 4. Фізичні характеристики, переваги і недоліки електролізерів

Тип електролізера	**Робоча температура (°C)**	**Тиск (МПа)**	**Ефективність (ККД %)**	**Переваги**	**Недоліки**
AWE	25–100	до 3	70–80	низька вартість, досконалість технології	повільна реакція, громіздкість
PEM	50–80	до 3	80–90	компактність, висока чистота водню	висока вартість
SOE	500–850	до 3	~90	висока ефективність	висока вартість, складність
AEM	25–60	до 3	~90	потенційно низька вартість	низька ефективність, стадія розробки

Таблиця 5. Продовження порівняльного аналізу табл.. 4

Параметр	**AWE**	**PEM**	**SOE**	**AEM**
Електроліт	Рідкий (KOH)	Тверда мембрана	Твердий оксид	Аніонна мембрана
Вартість	Низька	Висока	Висока	Середня
Час реагування	Повільний	Швидкий	Повільний	Середній
Чистота водню	Середня	Висока	Висока	Висока
Стадія комерціалізації	Дозріла	Активна	Пілотні проєкти	Ранні стадії

Таким чином, вибір типу електролізера залежить від конкретних умов застосування, доступних ресурсів та необхідних параметрів роботи. Лужні електролізери підходять для масштабного виробництва водню, протон-обмінні мембранні електролізери – для мобільних та інтегрованих систем, електролізери з твердими оксидами – для високотемпературних промислових процесів, а електролізери з аніонообмінними мембранами – для перспективних рішень із зниженими витратами.

Станом на сьогодні, виходячи з техніко-економічних міркувань, для вирішення поставлених в роботі завдань доцільно розглянути технічні характеристики існуючих двох основних видів електролізерів, які працюють на лужному електроліті [15]: моно полярні та біполярні електролізери (табл. 6).

Таблиця 6. Технічні характеристики існуючих електролізерів

Модель	Технологія виробництва H_2	Густина струму, А\см^2	Напруга на комірці , В	Продуктивність, м^3/год	Енергоспожи-вання, кВт·год	Температура, К	Тиск, МПа
Електроліз води під атмосферним тиском							
Norsk Atmospheric Type No.5010 (4000 Amp DC)	Біполярні	0,2–0,4	2,04–2,14	50	4,8	350–370	$2{,}1\cdot10^{-3}$
ФБ-500М	Біполярні	0,2–0,4	2,04–2,14	536	5,3	350–370	$1{,}0\cdot10^{-3}$
ELT «BAMAG»	Біполярні	0,2–0,4	2,04–2,14	330	4,5	350–370	$2{,}1\cdot10^{-3}$
Електроліз води під тиском							
TELEDYNE TITAN™ HMXT-100	Біполярні	0,2–0,4	1,87–2,1	5,6	5,3	350–370	0,6
Proton Energy Systems HOGEN H Series	Біполярні	0,2–0,4	1,87–2,1	6,0	6,3	350–370	1,5
Stuart IMET 1000	Біполярні	0,2–0,4	2,04–2,14	5,0	4,8	350–370	2,5
Перспективні розробки зразків електролізних систем							
ІПМаш НАНУ ЕВТ 1,0 – 150	Монополярні	0,02–0,1	0,4–1,6	1,0	3,9	350–370	20

На відміну від біполярних, моно полярні електролізери, мають простішу конструкцію та менші витрати електроенергії на генерацію водню. До позитивних характеристик існуючих електролізерів можна віднести: високу чистоту вихідного продукту (99,6-99,99%), простоту технологічного процесу, легкість автоматизації, можливість одержання водню безпосередньо під тиском, гнучку систему енергоспоживання, дешеву сировину, технологічний процес, що складається з одного виробничого ступеня. Основною негативною характеристикою залишаються високі енерговитрати на генерацію водню і кисню.

Принцип роботи паливного осередку

Паливний осередок - це електрохімічний пристрій, що перетворює хімічну енергію палива, найчастіше водню, безпосередньо в електричну енергію з виділенням тепла та води як побічних продуктів. Основними компонентами осередку є анод, катод і електроліт. На аноді водень розщеплюється на протони і електрони. Протони проходять через електроліт до катода, а електрони рухаються через зовнішнє електричне коло, створюючи електричний струм. На катоді протони, електрони та кисень з повітря з'єднуються, утворюючи воду. Цей процес є екологічно чистим і ефективним способом отримання енергії.

Етап	**Опис процесу**
1. Подавання палива	На анод подається водень (H_2), який є основним джерелом енергії.
2. Окиснення водню	На аноді водень розкладається на протони (H^+) і електрони (e^-).
3. Рух електронів	Електрони проходять через зовнішнє електричне коло, створюючи електричний струм.
4. Переміщення протонів	Протони проходять через електроліт до катода.
5. Реакція на катоді	На катоді протони, електрони та кисень (O_2) з повітря утворюють воду (H_2O).
6. Вихідні продукти	Результат реакції — електрична енергія, тепло та вода як єдиний побічний продукт.

1.3 Аналіз існуючих паливних комірок

Паливні комірки (ПК) є однією з ключових технологій у сфері альтернативної енергетики, які знаходять широке застосування у транспорті, стаціонарній енергетиці та портативних пристроях. На відміну від традиційних методів генерації електроенергії, паливні комірки забезпечують безпосереднє перетворення хімічної енергії палива в електричну за допомогою електрохімічної реакції. Цей процес відбувається з високою ефективністю та мінімальними шкідливими викидами, що робить паливні комірки перспективним напрямком розвитку енергетичних технологій. Вони є частиною глобального переходу до чистої енергетики, оскільки дозволяють значно зменшити викиди парникових газів у порівнянні з традиційними джерелами енергії.

Основним видом палива для паливних комірок є водень, хоча також можуть використовуватися метанол, природний газ або інші вуглеводневі сполуки. Водневі паливні комірки є найпоширенішими, оскільки вони забезпечують найвищий коефіцієнт корисної дії та екологічну чистоту, оскільки єдиним побічним продуктом їх роботи є вода.

Основними компонентами ПК є анод, катод та електроліт. На відміну від традиційних двигунів, паливні комірки не мають рухомих частин, що підвищує їхню надійність та знижує шум під час роботи.

В залежності від типу електроліту для відносно низького температурного режиму роботи доцільно проаналізувати кілька основних типів паливних комірок:

- Паливні елементи з протонообмінною мембраною (PEMFC),
- Твердооксидні паливні елементи (SOFC),
- Паливні елементи на основі фосфорної кислоти (PAFC),
- Лужні паливні елементи (AFC),
- Паливні елементи прямого метанолу (DMFC).

Кожен тип має свої особливості, що визначає сферу його застосування - від транспорту до стаціонарного виробництва .енергії.

Паливні комірки з протонообмінною мембраною (PEMFC) є найбільш поширеним типом, що використовується в автомобільній промисловості та портативних пристроях [36].

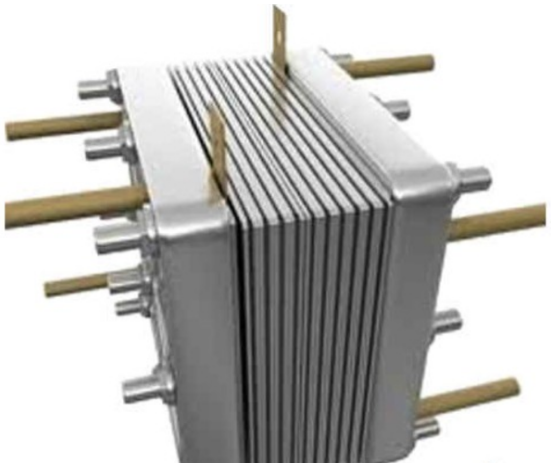


Рис. 11. Паливна комірка з протонообмінною мембраною (1000W PEM Fuel Cell Stack)

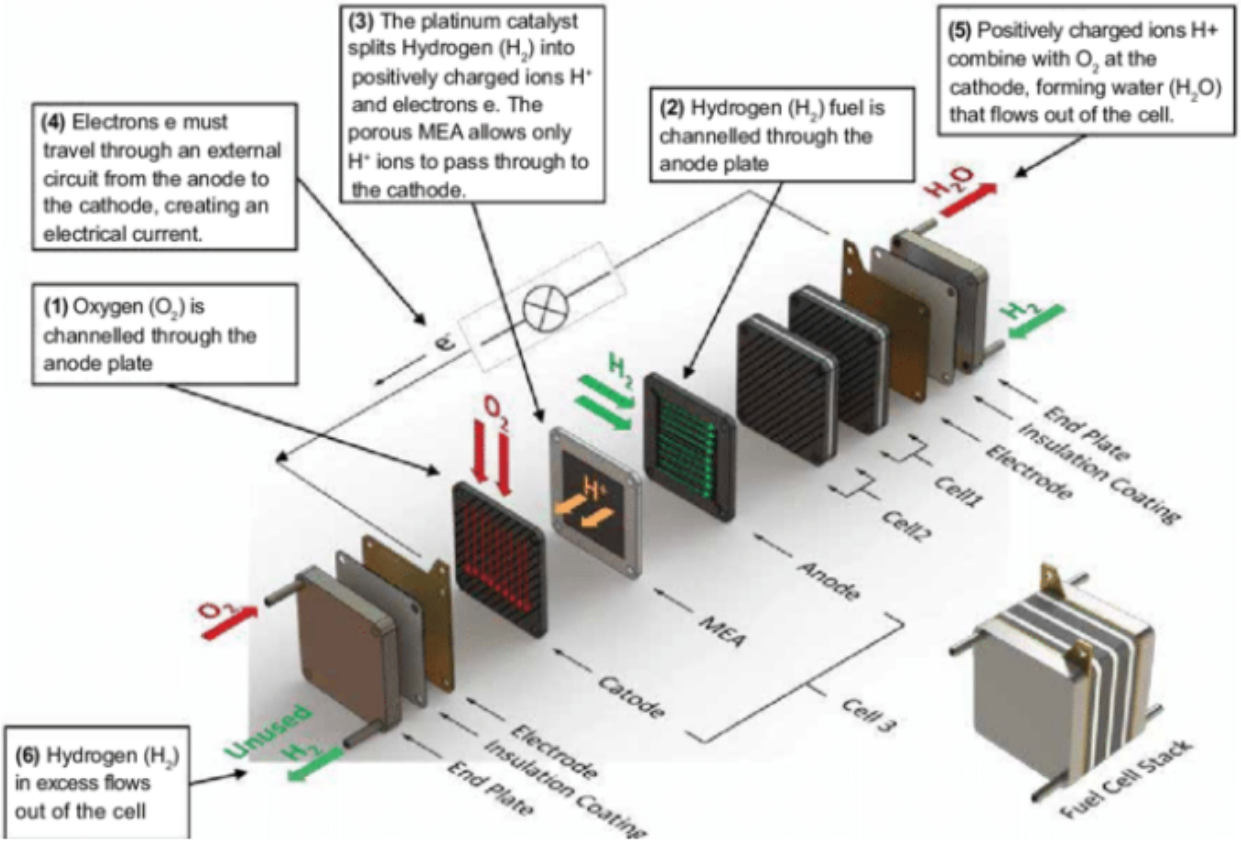


Рис. 12. Ключові процеси і компоненти паливної комірки з протонообмінною мембраною (PEMFC).

Цей тип паливних комірок працює при відносно низьких температурах (близько 80°C), має швидкий час реакції та високу енергетичну густину. Основним недоліком цього типу комірок є чутливість до забруднень у водні та необхідність використання дорогих каталізаторів, таких як платина. Проте дослідження у сфері розробки альтернативних каталізаторів та покращення структури мембран сприяють зниженню вартості цих комірок.

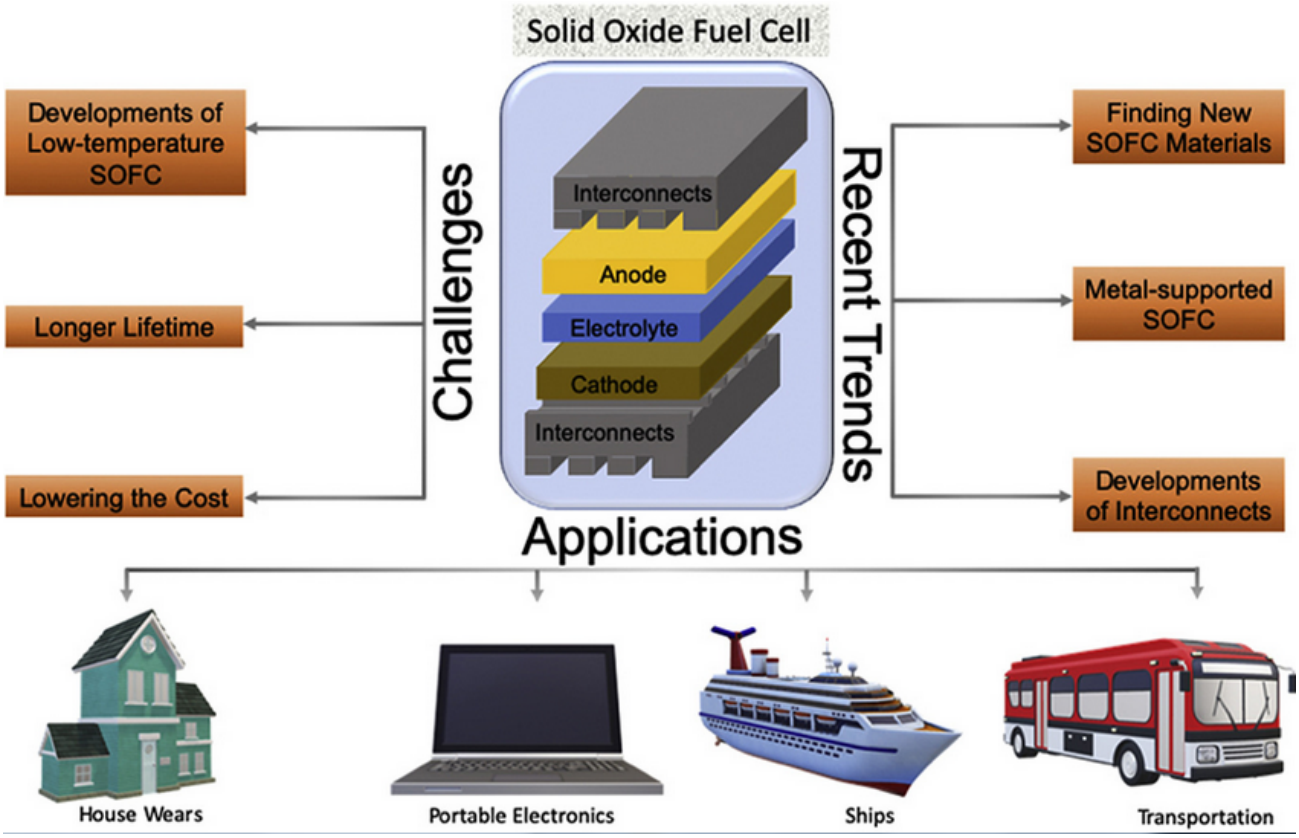


Рис. 13. Ключові компоненти твердооксидних паливних комірок (SOFC) і перспективні сфери їх застосування.

Твердооксидні паливні комірки (SOFC) мають найвищу робочу температуру серед усіх типів (від 600 до 1000°C). Вони характеризуються високою ефективністю та можливістю використання різних видів палива без попередньої його очистки [37]. Завдяки цьому SOFC є привабливими для стаціонарної енергетики, зокрема для комбінованого виробництва тепла та електроенергії.

Основними недоліками є необхідність використання жаростійких матеріалів і тривалий час запуску системи. Водночас високотемпературний режим роботи дозволяє застосовувати недорогі неметалеві каталізатори, що може зменшити вартість виробництва таких комірок у майбутньому.

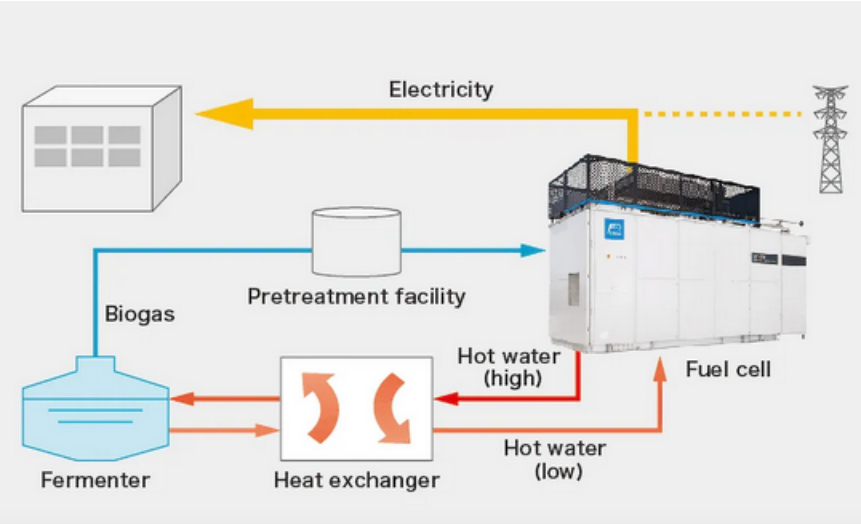


Рис. 14. 100 кВт Fuji Electric's паливні комірки на основі фосфорної кислоти (PAFC) в структурі енергетичного комплексу.

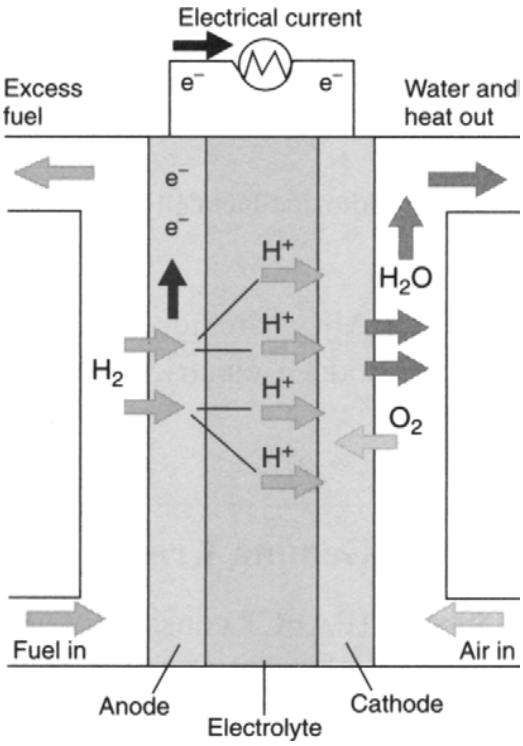


Рис. 15. Ключові процеси і компоненти кислотної паливної комірки (PAFC).

Кислотні паливні комірки (PAFC) використовуються в стаціонарних енергетичних установках [38]. Вони мають вищу робочу температуру (від 150 до 200°C) і можуть працювати на природному газі або інших вуглеводневих паливних сумішах. PAFC відзначаються стабільною роботою та високим коефіцієнтом корисної дії, проте їхня вартість залишається досить високою. Завдяки використанню фосфорної кислоти як електроліту такі комірки є відносно нечутливими до забруднень палива, що робить їх привабливими для комерційного використання.

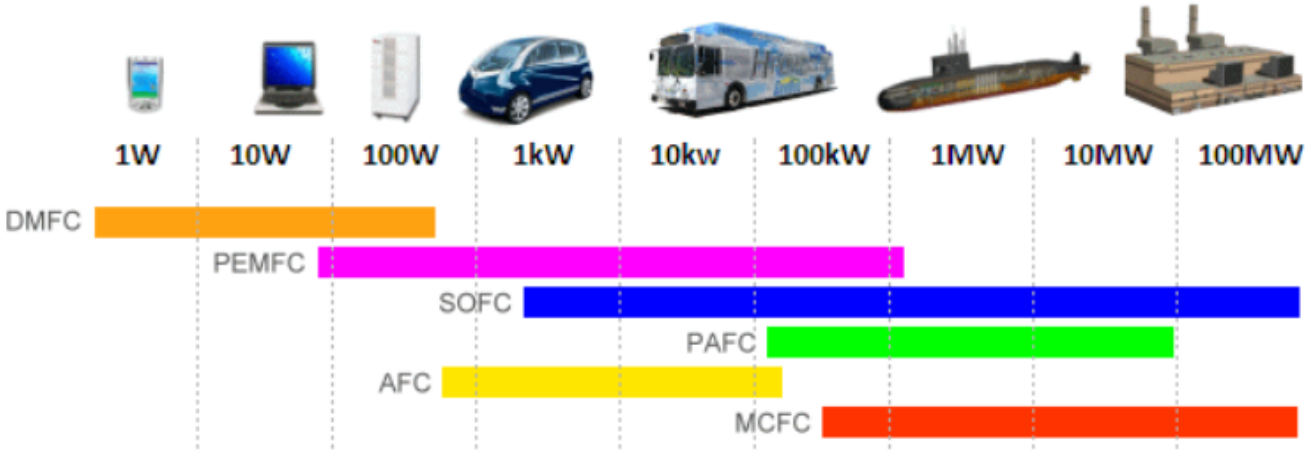


Рис. 16. Діапазон застосувань лужних паливних комірок (AFC) за потужністю.

Лужні паливні комірки (AFC) використовуються у космічній техніці та військових застосуваннях. Вони мають високий ККД (до 60%) та працюють при помірних температурах [39]. Проте AFC чутливі до вуглекислого газу, що обмежує їхнє використання в атмосферних умовах. Крім того, необхідність ретельного очищення пального та обмежений термін служби мембран ускладнюють широке застосування AFC у цивільних енергетичних проєктах.

Метанольні паливні комірки (DMFC) відзначаються компактністю та можливістю безпосереднього використання рідкого метанолу як пального. Вони застосовуються у портативних пристроях та невеликих автономних джерелах живлення. Основними обмеженнями є низький ККД порівняно з іншими типами комірок та обмежена потужність. Попри це, тривають розробки щодо покращення

ефективності каталітичних реакцій у DMFC, що може сприяти їхньому подальшому поширенню [40].

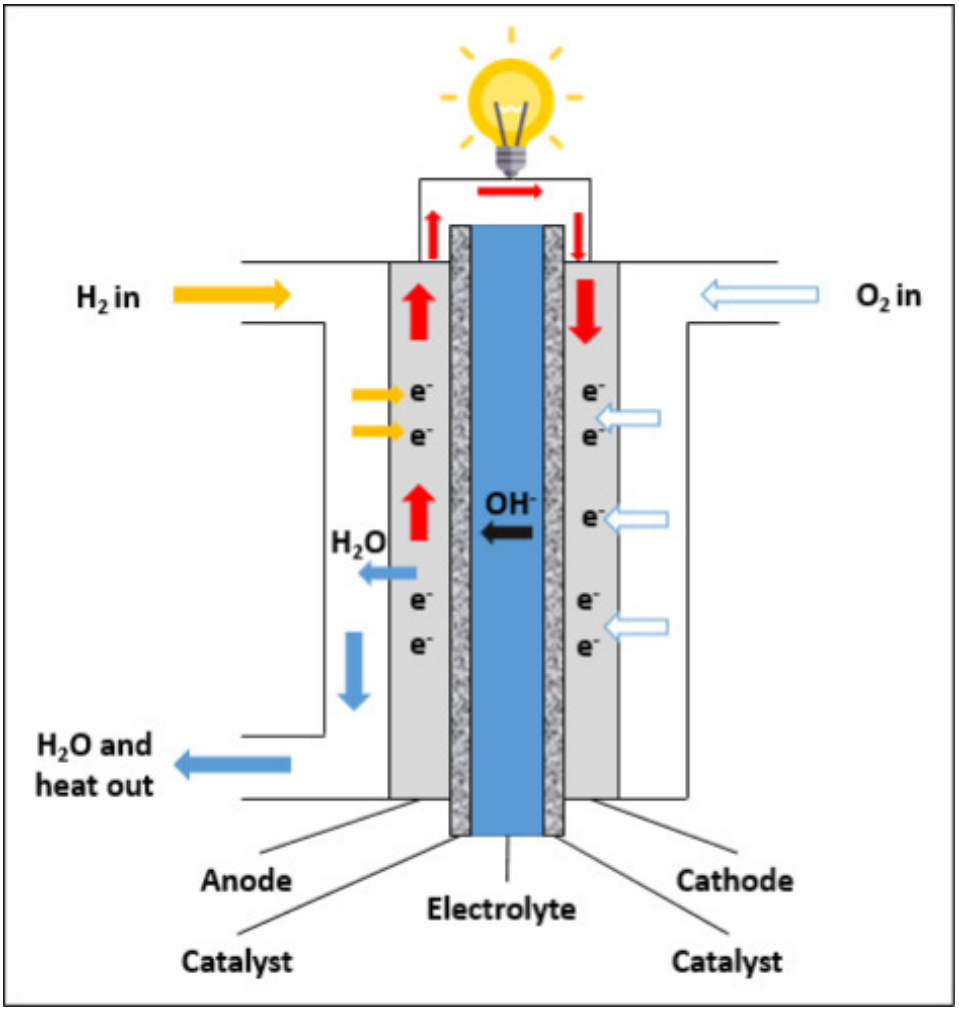


Рис. 17. Ключові процеси і компоненти лужної паливної комірки (AFC).

Таким чином, розвиток паливних комірок залежить від удосконалення матеріалів для електродів і електролітів, зменшення вартості каталізаторів та покращення довговічності систем. Подальші дослідження та інвестиції у цей напрямок сприятимуть широкому впровадженню паливних комірок у різні сфери енергетики та транспорту, що, своєю чергою, сприятиме зменшенню залежності від викопних видів палива та покращенню екологічної ситуації. Крім того, вдосконалення технологій виробництва та зберігання водню, а також розбудова

відповідної інфраструктури відіграватимуть ключову роль у прискоренні переходу до використання паливних комірок у промислових і комерційних масштабах.

DMFC Series



	DMFC 25	DMFC 60	DMFC 120	DMFC 200	DMFC 300
Output	25W	60W	120W	200W	300W
Voltage	8~30V DC		12/24/48V DC、220V AC		
Weight	1.7kg	4.2kg	9.2kg	15kg	22kg
Dimension (mm)	178 X89 X 223	302 X107 X 200	422 X188 X 278	563 X242 X 285	680 X258 X 285
Operating Temp.	-40℃ ~+50℃				
Operating noise	~40 dB(A)				
Energy consumption	0.85L (Methanol) /kWh				
Application	≤5000m				

Рис. 18. Характеристики комерційних метанольних паливних комірок (DMFC).

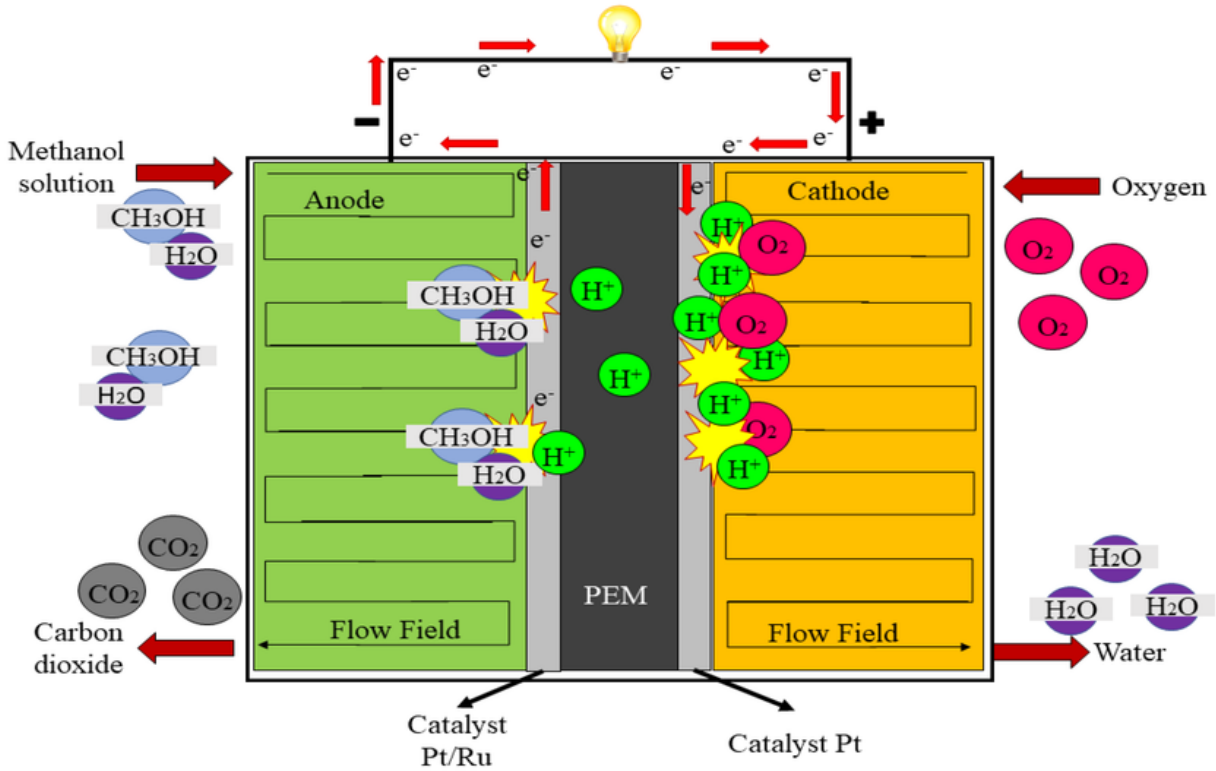


Рис. 19. Ключові процеси і компоненти метанольної паливної комірки (DMFC).

З огляду на проведений аналіз основні характеристики паливних комірок можна звести в порівняльну таблицю 7.

Таблиця 7. Типи паливних комірок та їх основні характеристики

Тип ПК	**Робоча температура** °C	**Електроліт**	**Переваги**	**Недоліки**	**Ефективність вироблення електроенергії**	**Тип палива**
PEMFC	60–80	Полімерна мембрана	Швидкий запуск, компактність, екологічність	Висока вартість каталізаторів, чутливість до CO_2	35–50 %	Чистий водень
SOFC	600–1000	Керамічний оксид	Висока ефективність, використання різного палива	Висока температура, повільний старт	45–70%	Вуглеводневе паливо
PAFC	150–220	Фосфорна кислота	Стабільна робота, толерантність до домішок	Корозія, низька потужність на одиницю об’єму	35-40%	Чистий водень
AFC	60–90	Лужний розчин	Високий ККД, низька вартість	Чутливість до CO_2, складність у поводженні	40-70%	Чистий водень
DMFC	60–130	Полімерна мембрана	Пряме використання метанолу, компактність	Низький ККД, обмежена потужність	20-30%	Метанол

Особливий інтерес викликають енергоустановки на основі низькотемпературних лужних паливних комірок. Вони працюють при відносно низькій температурі (до 373 К), характеризуються відносно високим ККД (до 70 %), безшумністю в роботі, високою питомою продуктивністю та екологічною чистотою. Основним їхнім недоліком є неприпустимість наявності CO_2 в паливі та окиснювачі [15]. Найперспективнішими для автономних споживачів є енергоустановки потужністю від 1 до 20 кВт на основі низькотемпературних лужних ПК. При використанні таких енергоустановок на основі ПК виробляється

тепло, яке може інтегруватися в технологічних цілях його взаємодії з металогідридом (МГ), що значно збільшує загальну ефективність системи. Ця інноваційна технологія якнайкраще підходить для ефективного вироблення електричної енергії без необхідності у вартісній інфраструктурі та складній інтеграції приладів.

РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ АКУМУЛЮВАННЯ ЕНЕРГІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ЕЛЕКТРОЛІЗЕРА ТА ПАЛИВНОЇ КОМІРКИ

2.1. Існуючі системи отримання та акумулювання водню і генерування електроенергії

У світі активно впроваджуються автономні системи акумулювання енергії на основі водневих технологій, особливо у сфері відновлюваної енергетики. Такі системи поєднують вироблення водню шляхом електролізу та його зворотне перетворення в електроенергію за допомогою паливних комірок. Це дозволяє створити гнучкі автономні енергокомплекси, що не залежать від централізованої мережі.

Siemens Energy – проект SILYZER

SILYZER 300 - промисловий електролізер PEM-типу, розроблений компанією Siemens для інтеграції з відновлюваними джерелами енергії. Потужність: до 17.5 МВт; Робочий тиск: до 35 бар; Температура: 50–80°C; ККД: 65–75%. Застосовується у проєкті "H2Future".

ITM Power – проект REFHYNE (Німеччина)

Електролізер PEM-типу потужністю 10 МВт у рамках проєкту REFHYNE. Потужність: 10 МВт; Тиск: до 30 бар; Вихід H_2: до 1,500 кг/день.

H2RES (Данія)

Проєкт автономної системи з вітровою електростанцією, електролізером (2 МВт) та паливною коміркою (1 МВт).

Ballard Power Systems (Канада)

Паливні комірки FCmove™-HD: Потужність: 70–100 кВт; Температура роботи: до 80°C; ККД: до 60%.

Таблиця 8. Порівняння існуючих проектів

Компанія	Тип пристрою	Потужність	Тиск (бар)	Температура (°C)	ККД (%)
Siemens	PEM	17.5 МВт	до 35	50–80	65–75

Energy	електролізер				
ITM Power	PEM електролізер	10 МВт	до 30	~70	70
Ballard Power	PEM паливна комірка	100 кВт	-	до 80	до 60
H2RES	Гібрид	2+1 МВт	до 35	50–80	~40 (система)

Сучасні тенденції у сфері енергетики дедалі частіше зосереджені на розвитку відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна та вітрова, однак нестабільність їх генерації потребує надійних рішень для зберігання надлишкової енергії. Одним із найперспективніших підходів до акумулювання енергії є система, що поєднує електролізер та паливну комірку. Вона дає змогу не лише накопичувати надлишкову електроенергію у вигляді водню, а й повертати її до мережі у вигляді електричної енергії в моменти пікового навантаження або браку генерації.

Принцип роботи електролізера ґрунтується на процесі електролізу води – розкладу води на водень і кисень під дією електричного струму. Цей процес відбувається у спеціальному пристрої – електролізері, до електродів якого підводиться постійна напруга. При цьому на катоді (негативному електроді) виділяється водень, а на аноді (позитивному електроді) – кисень. Реакція має вигляд:

$$2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2$$

Процес електролізу є ендотермічним і потребує підведення енергії. У контексті відновлюваної енергетики електролізери використовують надлишкову електроенергію, яку виробляють сонячні батареї або вітряні турбіни в періоди мінімального споживання.

Отриманий водень акумулюється в спеціальних резервуарах або в газовій мережі, а в разі потреби в електроенергії він подається до паливної комірки –

пристрою, який здійснює зворотний процес. У паливній комірці відбувається реакція водню з киснем повітря з утворенням води і виділенням енергії у формі електричної та теплової. Типова реакція виглядає так:

$$2H_2+O_2 \rightarrow 2H_2O + \text{електроенергія} + \text{тепло}$$

Таким чином, паливна комірка виконує функцію генератора електроенергії, яка може використовуватись безпосередньо у споживача або подаватись до загальної енергетичної системи.

Важливо зазначити, що ефективність такої замкнутої системи, яка охоплює як електроліз, так і зворотне перетворення водню в електроенергію, залежить від технологічного рівня обох пристроїв. Сучасні електролізери можуть досягати ККД до 80%, а паливні комірки – до 60%. Однак загальна ефективність циклу (від електроенергії до водню і назад до електроенергії) коливається в межах 30–45%. Попри це, головна перевага – можливість зберігання великої кількості енергії на тривалий час, що робить систему особливо актуальною для стабілізації енергомереж.

Ілюстрація принципової схеми роботи системи електролізер – паливна комірка:

Електроенергія (з ВДЕ)

↓

Електролізер

↓

Водень (H_2)

↓

Зберігання (балони або підземні сховища)

↓

Паливна комірка

↓

Електроенергія + тепло → у споживача / в мережу

Цикл перетворень забезпечує гнучкість та адаптивність енергосистеми, дозволяючи ефективно використовувати змінне енергопостачання з ВДЕ. У практиці енергетичних комплексів такі системи дедалі частіше застосовуються як частина так званих «розумних мереж» (smart grids), у яких важливим чинником є баланс між генерацією та споживанням у режимі реального часу.

У промислових масштабах система електролізера та паливної комірки вже реалізується, зокрема, у країнах Європейського Союзу, Японії, Південної Кореї. Наприклад, у проєкті «H2Future» в Австрії водень, отриманий через електроліз із використанням енергії вітру, використовується не лише для зберігання, а й як екологічно чисте паливо для важкої промисловості. Водночас у Японії активно розвиваються мікромережі на базі водневих паливних комірок, які забезпечують енергонезалежність окремих будівель чи районів.

Таблиця 9. Порівняння типових характеристик електролізера та паливної комірки

Параметр	**Електролізер**	**Паливна комірка**
Принцип роботи	Розщеплення води на H_2 і O_2	Окиснення H_2 до утворення H_2O
Джерело енергії	Електроенергія	Водень
Продукт	Водень і кисень	Електроенергія і тепло
Типовий ККД	65–80%	45–60%
Робоча температура	50–800°C (залежно від типу)	60–1000°C
Основні типи	PEM, лужні, SOEC	PEM, SOFC

У сучасному енергокомплексі електролізери можуть виступати елементами балансування в поєднанні з іншими накопичувачами – акумуляторами, гідроакумулюючими станціями тощо. Системи на водні, хоч і мають нижчий ККД, мають значні переваги у довгостроковому зберіганні великих обсягів енергії.

Отже, система, що об’єднує електролізер та паливну комірку, створює нову парадигму в енергетиці – так зване «водневе коло», здатне забезпечити сталість, екологічність та ефективність у майбутньому енергетичному балансі. Надалі, в умовах розвитку водневої інфраструктури та зниження вартості обладнання, ці технології можуть стати основою децентралізованої і гнучкої енергетичної системи нового покоління.

Окрім загальних принципів роботи електролізера та паливної комірки, важливо розглянути особливості їхньої інтеграції в сучасні енергетичні комплекси, де поєднуються виробництво, накопичення і споживання енергії на основі відновлюваних джерел. Така інтеграція є складною інженерною задачею, яка потребує синхронізації численних параметрів: варіацій потужності від джерел ВДЕ, часу накопичення, об'єму водневих резервуарів, типу паливної комірки, а також теплових втрат при зворотному перетворенні.

Технічні аспекти інтеграції

У класичній схемі електролізер підключається безпосередньо до інверторів або контролерів сонячної/вітрової установки. Основним викликом у цьому процесі є управління змінним струмом виробництва. Оскільки електролізери мають певний оптимальний діапазон роботи, надлишки або нестабільна генерація ВДЕ можуть знижувати їхній ККД. Для подолання цієї проблеми використовують буферні батареї або систему управління живленням, яка направляє надлишкову енергію до електролізера лише тоді, коли вона дійсно не може бути використана безпосередньо.

З іншого боку, паливні комірки потребують постійного потоку водню з певним тиском і чистотою. Водень, який зберігається після електролізу, має проходити осушення і фільтрацію, якщо він використовується для ПК. З огляду на це, у комплексних енергосистемах часто впроваджують системи очищення і компресії газу, що дозволяє забезпечити стабільні параметри живлення для паливних комірок.

Енергетичні втрати та балансування

Істотним фактором при оцінці ефективності використання системи електролізер–паливна комірка є сумарні енергетичні втрати на кожному етапі. Наприклад:

1. При електролізі втрачається до 20–35% електроенергії.
2. При стисканні або зрідженні водню — ще 10–15%.
3. При зворотному перетворенні водню в електроенергію в паливній комірці — втрачається близько 40–50%.

Таким чином, із 100 кВт·год вхідної енергії з ВДЕ на виході залишається не більше ніж 30–40 кВт·год. Це може здатися неефективним, однак ця система дає змогу зберігати енергію у великому обсязі та на тривалий час, що не можуть забезпечити акумуляторні батареї через обмежений ресурс циклів і втрати заряду протягом часу (self-discharge).

У табл. 10 наведено порівняння втрат енергії при використанні різних накопичувальних технологій.

Таблиця 10. Порівняння енергетичних втрат у різних системах акумулювання

Технологія	**ККД повного циклу (%)**	**Тривалість зберігання**	**Обсяг зберігання**	**Екологічність**
Літій-іонні батареї	85–95	Години – доби	Обмежений (до 100 МВт·год)	Середня (використання рідкісних металів)
Гідроакумулювання	70–85	Тижні – місяці	Дуже великий	Висока (без відходів)

Водень (електролізер + ПК)	30–45	Місяці – роки	Потенційно необмежений	Висока (відсутність CO_2)

Незважаючи на нижчий ККД, саме воднева система найкраще підходить для довготривалого зберігання енергії, що критично важливо для «зимових провалів» сонячної генерації або сезонних змін вітрової активності.

Надійність і модульність

Перевагою водневої системи є також її модульність. Можна масштабувати систему як у бік мікроустановок (для автономних домогосподарств), так і для цілих промислових енергопарків. Наприклад, установка з електролізером потужністю 1 МВт у поєднанні з водневим сховищем на 1000 кг H_2 та ПК потужністю 500 кВт здатна забезпечити безперервну автономну роботу критичних інфраструктур протягом декількох діб.

Це особливо актуально для віддалених районів, де немає централізованого енергопостачання, або для об'єктів критичної інфраструктури – лікарень, систем водопостачання, транспортних вузлів.

Сучасні приклади застосування

У світі вже реалізовано низку масштабних проєктів, які демонструють дієвість концепції електролізера та паливної комірки. Наприклад:

1. **REFHYNE (Німеччина)** – установка на території нафтопереробного заводу у Нордрайн-Вестфалії використовує електролізер потужністю 10 МВт для виробництва «зеленого» водню, що далі подається до паливних комірок у промисловому циклі.
2. **H2RES (Данія)** – пілотний проєкт на базі вітрової електростанції, де надлишкова електроенергія йде на електроліз води з подальшим використанням водню як резервного палива для генерації в години пікових навантажень.

3. **Fukushima Hydrogen Energy Research Field (Японія)** – один із найбільших у світі проєктів, що демонструє повну автономність на базі ВДЕ, електролізу і паливних комірок для міських енергопотреб.

Ці приклади вказують на здатність водневих систем забезпечувати як централізовану, так і децентралізовану модель енергетики, що відповідає вимогам сталого розвитку.

2.2. Аналіз ефективності системи акумулювання енергії та перспективи її застосування

У сучасному енергетичному середовищі, що характеризується децентралізацією, зростаючою долею відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та потребою у сталості енергопостачання, системи акумулювання енергії відіграють критично важливу роль. Серед усіх відомих технологій зберігання, саме воднева система — на основі електролізера і паливної комірки пропонує стратегічну гнучкість, довготривале зберігання та можливість інтеграції з різними секторами економіки. Оцінка ефективності такої системи повинна враховувати не лише енергетичні показники, але й екологічні, економічні та технологічні фактори, які впливають на її доцільність та життєздатність.

З технічної точки зору, загальний коефіцієнт корисної дії (ККД) системи, що поєднує електроліз води, зберігання водню та його перетворення на електроенергію у паливній комірці, знаходиться в діапазоні 30–45%. Це означає, що при збереженні 1 МВт·год енергії у вигляді водню, назад у вигляді електроенергії можна отримати лише близько 300–450 кВт·год. Однак такий підхід дозволяє уникнути втрат, пов’язаних із простоюванням або втратою виробленої енергії з ВДЕ. Таким чином, ефективність системи необхідно оцінювати не тільки через коефіцієнт перетворення, але і в контексті енергетичної безпеки, безвідходного використання енергії та стабілізації мереж.

Суттєвою перевагою водневої системи над іншими акумулюючими технологіями є можливість її масштабування: від мікромереж до промислових хабів. Наприклад, акумуляторні системи мають обмеження щодо терміну зберігання - як правило, вони втрачають заряд за кілька діб або тижнів. У випадку з воднем втрати при зберіганні практично відсутні за умови герметичності ємностей. Це робить таку систему ідеальною для сезонного балансування - зберігання надлишку літньої сонячної генерації з подальшим використанням узимку.

Результати моделювання, виконані на основі програм, таких як HOMER Pro, EnergyPLAN або MATLAB Simulink, демонструють, що в умовах сонячної електростанції потужністю 500 кВт інтеграція водневої системи дозволяє зменшити втрати енергії до 70%, порівняно зі сценарієм без накопичувача. Умовна економія при цьому складає близько 25–30% на рік за рахунок компенсації енергії в нічний час та в періоди низької генерації.

Таблиця 11. Порівняння ефективності акумулюючих систем у різних сценаріях використання

Параметр / Технологія	**Літій-іонна батарея**	**Гідроакумуляція**	**Воднева система (електролізер + ПК)**
ККД повного циклу	85–95%	70–85%	30–45%
Час зберігання	Години – дні	Дні – тижні	Тижні – місяці
Ємність	до 100 МВт·год	> 1000 МВт·год	Теоретично необмежена
Вартість/кВт·год (2025, оцінка)	~150–250 $	~200–300 $	~180–220 $
Придатність для мобільності	Висока	Відсутня	Середня/висока
Екологічність	Умовна	Висока	Висока
Сфера оптимального застосування	Короткотермінове резервування	Пікове навантаження	Сезонне зберігання, децентралізація

Ключовою перевагою водневого підходу також є мультифункціональність: водень, на відміну від енергії в акумуляторах, може використовуватись не лише для генерації електроенергії, але й як паливо для транспорту, як сировина в

хімічній промисловості, як джерело тепла або навіть для генерації пара в централізованих системах теплопостачання.

Окрім того, використання водню як буферної ланки між електричною, тепловою та транспортною інфраструктурою сприяє створенню енергетичних кластерів нового типу – «Power-to-X». Це концепція, у межах якої електроенергія перетворюється на інші форми: Power-to-Gas (водень), Power-to-Liquid (метанол, синтетичне паливо), Power-to-Heat (тепло), з гнучким перемиканням в залежності від ринкових умов та потреб. Таким чином, електролізер і паливна комірка не лише працюють як акумулятор, а виступають системоутворюючими елементами декарбонізованої економіки.

У стратегічній перспективі розвиток таких систем дозволить:

- зменшити залежність від імпортних енергоносіїв;
- децентралізувати енергетику, зменшивши втрати на транспортування;
- стабілізувати електромережі при високій долі ВДЕ;
- створити базу для розвитку водневого транспорту;
- сформувати нові сектори ринку (виробництво, обслуговування, інфраструктура зберігання).

Згідно з даними Hydrogen Council (2023), вже до 2030 року близько 18% усієї акумульованої енергії в ЄС буде зберігатися у формі водню. У країнах з великою кількістю сонячних годин (Іспанія, Австралія, Південна Корея) відбувається будівництво водневих хабів, здатних обслуговувати не лише місцеві потреби, але й експорт.

На рівні України, попри складні геополітичні умови, водневі ініціативи мають потенціал для розвитку, зокрема в регіонах із високим сонячним потенціалом – Одещина, Херсонщина, Запорізька область. Вже зараз розглядаються пілотні проєкти створення автономних енергетичних мікрогридів для військових об'єктів та громад, які постраждали внаслідок руйнування централізованої енергосистеми.

Ефективність системи акумулювання енергії на основі електролізера і паливної комірки не обмежується лише технічними показниками. Її реальна цінність полягає у здатності трансформувати парадигму енергетичного споживання, перетворити електроенергію у транспортне паливо, джерело тепла і навіть експортний ресурс. У поєднанні з розвитком цифрових систем управління і предиктивної аналітики, такі системи стануть основою розумних, децентралізованих енергетичних комплексів майбутнього.

Оцінюючи ефективність системи акумулювання енергії на базі електролізера та паливної комірки, доцільно звернути увагу на показники не лише енергетичної ефективності, а й системної гнучкості, довговічності, економічної окупності та адаптивності до кліматичних умов. У цьому контексті ключову роль відіграє показник LCOS (Levelized Cost of Storage) – усереднена вартість зберігання одиниці енергії протягом життєвого циклу системи.

Сучасні оцінки показують, що LCOS для водневих систем становить від 0,20 до 0,40 USD/кВт·год, що є конкурентоспроможним порівняно з акумуляторними системами, особливо для довготривалого зберігання (від 100 годин до кількох тижнів). У міру зниження вартості електролізерів (очікується падіння до 300 $/кВт до 2030 року) та підвищення ефективності паливних комірок, економічні показники таких систем покращуватимуться.

Важливим аспектом, що впливає на ефективність, є режим експлуатації системи: для стабільної роботи електролізера переважно необхідний сталий рівень напруги, тому пряме підключення до ВДЕ часто доповнюється буферною системою живлення. Паливна комірка, своєю чергою, краще працює у постійному або передбачуваному навантаженні, тому найвища ефективність досягається тоді, коли система працює у *графіку попиту*, а не лише як резерв.

Іншим параметром є гнучкість у розміщенні. Водневі системи не вимагають специфічного рельєфу чи водного ресурсу (як, наприклад, гідроакумулюючі станції), а тому їх можливо встановлювати як у міських умовах, так і у віддалених

районах. Зважаючи на це, вони можуть слугувати ефективним рішенням для енергетичного забезпечення острівних систем, мікромереж або об’єктів, відрізаних від централізованого енергопостачання.

У соціально-економічному вимірі система «електролізер–паливна комірка» створює можливості для нових ланцюгів доданої вартості – виробництво компонентів, монтаж, обслуговування, розробка програмного забезпечення для моніторингу. У межах промислових зон або технопарків такі системи можуть бути інтегровані у систему утилізації відходів тепла, що додатково підвищує загальний ККД комплексу (до 80% у випадках когенерації – одночасного виробництва тепла й електроенергії).

Ще однією перевагою є екологічна доцільність. При використанні «зеленого» водню (електроліз води за допомогою ВДЕ) система забезпечує повністю вуглецево-нейтральний цикл. З урахуванням глобальних кліматичних зобов’язань, таких як Європейський зелений курс (Green Deal) чи ініціативи Carbon Border Adjustment Mechanism, воднева система з високим вмістом ВДЕ може сприяти не лише зниженню викидів, а й підвищенню експортної конкурентоздатності енергоємної продукції (металургія, цемент, добрива).

Оцінюючи перспективи впровадження, варто зазначити, що регіональні умови значною мірою визначають ефективність такої системи. У країнах із високим рівнем сонячної інсоляції чи потужним вітровим потенціалом (Ізраїль, ОАЕ, Марокко, Австралія, Чилі) електролізери можуть працювати з оптимальним навантаженням більшу частину доби, що підвищує рентабельність інвестицій. Для України такі системи особливо перспективні у південних та східних регіонах, де кількість сонячних годин сягає 1800–2000 на рік, а також для територій, що мають обмежений доступ до централізованої електромережі (села, військові частини, мобільні госпіталі).

Нарешті, не можна оминути й інституційно-регуляторний аспект. Світові тренди демонструють зростання підтримки з боку держави та наднаціональних

структур. Наприклад, Європейський Союз планує створення до 2030 року щонайменше 40 ГВт потужностей електролізу, а ще 40 ГВт — у країнах-партнерах для імпорту. Для України це відкриває можливості участі в міжнародних проєктах, доступу до фінансування (наприклад, Horizon Europe, EIB Green Loans), а також експорту «зеленого» водню або похідних продуктів (зеленого аміаку, метанолу).

Таким чином, ефективність системи акумулювання енергії на базі електролізера і паливної комірки виходить далеко за межі традиційного розуміння «вхід – вихід». Це комплексне рішення, яке одночасно вирішує технічні, екологічні, економічні та стратегічні завдання — від децентралізації енергосистеми до формування водневої економіки нового покоління.

РОЗДІЛ 3 РОЗРАХУНОК АВТОНОМНОЇ СИСТЕМИ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СПОЖИВАЧА

3.1 Визначення кількості водню для забезпечення стабільної роботи паливної комірки в автономній системі енергозабезепечення споживача

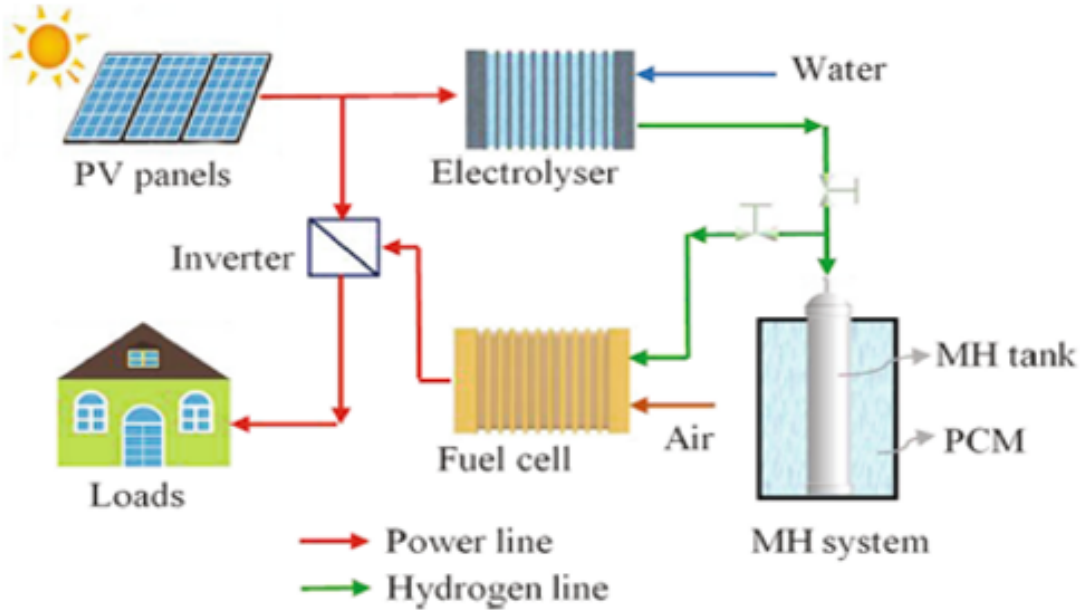


Рис. 20. Схема автономної системи отримання та акумулювання водню і генерування електроенергії.

Автономне енергозабезпечення на основі водневих технологій розглядається як одне з найбільш перспективних рішень для регіонів з обмеженим доступом до централізованих джерел електроенергії або у випадках, коли необхідне резервне чи постійне живлення для об’єктів критичної інфраструктури. Система, що базується на виробництві водню (наприклад, за допомогою електролізера) та його подальшому використанні в паливній комірці, дозволяє створити замкнутий цикл виробництва і споживання енергії з високим рівнем автономності.

Першим і ключовим етапом проектування такої системи є визначення добового споживання електроенергії користувача. Наприклад, типовий приватний будинок з електроопаленням, освітленням, побутовою технікою, мережею безпеки та системами вентиляції може споживати в середньому близько 10–12 кВт·год на добу. Для промислового або комерційного об’єкта ці значення можуть сягати 30–50 кВт·год на добу і більше.

Після цього оцінюється ефективність перетворення водню в електроенергію. Сучасні паливні комірки, зокрема з протонообмінною мембраною (PEMFC) або лужні комірки (AFC), мають ККД в межах 40–60%. Отже, для отримання необхідної кількості енергії потрібно генерувати більший обсяг водню, ніж було б потрібно при 100% ефективності.

У таблиці 12 наведено орієнтовну добову потребу у водні для забезпечення роботи паливної комірки при різному рівні споживання електроенергії.

Таблиця 12. Добова потреба у водні для забезпечення споживача

Добове споживання електроенергії, кВт·год	Кількість водню (за ККД 50%), кг	Кількість водню (за ККД 60%), кг
5	0.30	0.25
10	0.60	0.50
20	1.20	1.00
30	1.80	1.50
50	3.00	2.50

Ці розрахунки свідчать про те, що навіть для забезпечення енергією середнього домогосподарства потрібно близько 0.6 кг водню на добу. Для промислових об'єктів необхідний обсяг може перевищувати 3 кг на добу.

Особливої уваги потребує розрахунок кількості водню на тривалий період автономної роботи - наприклад, на тиждень або місяць. Такий підхід дозволяє

проектувати обсяг резервуару або системи акумулювання. У таблиці 13 представлено відповідні дані для найбільш поширених сценаріїв.

Таблиця 13. Необхідна кількість водню на період автономної роботи

Тривалість автономної роботи	Побутовий об'єкт (10 кВт·год/день)	Промисловий об'єкт (30 кВт·год/день)
1 доба	0.6 кг	1.8 кг
7 діб	4.2 кг	12.6 кг
30 діб	18.0 кг	54.0 кг

Об’єм водневого сховища має відповідати зазначеним обсягам, а також враховувати параметри безпеки, втрати при зберіганні, тиск і температуру. Слід зазначити, що для довготривалого зберігання оптимальним є використання металогідридних систем або високотискових резервуарів, які забезпечують зниження втрат і більш безпечну експлуатацію.

Крім розрахунку маси водню, важливо враховувати також інфраструктурні обмеження. Зокрема:

- максимальний обсяг газу, що може бути безпечно збережений у обраній ємності;
- частоту циклів зарядки/розрядки (особливо актуально для змінного навантаження);
- потребу у очищенні водню перед подачею на паливну комірку.

Відтак, система повинна містити не лише резервуар, а й компресор, осушувач, фільтри та систему моніторингу параметрів газу.

У сучасних проєктах автономного енергозабезпечення часто використовуються модульні системи, що дозволяють масштабувати рішення. Наприклад, одна модульна система може виробляти та накопичувати до 10 кг водню на тиждень, забезпечуючи до 15–20 кВт·год на добу.

У підсумку, визначення необхідної кількості водню є ключовим етапом у проектуванні автономної системи енергозабезпечення. Коректні розрахунки дозволяють:

- забезпечити надійність енергопостачання;
- уникнути надмірних витрат на зберігання;
- оптимізувати вартість обладнання.

Такий підхід відкриває нові можливості для енергонезалежності приватних будинків, підприємств і критичних інфраструктурних об’єктів.

Аналіз визначення необхідної кількості водню для стабільної роботи паливної комірки в автономній енергетичній системі, слід детальніше розглянути взаємозв’язок між типом споживача, рівнем його енергоспоживання та умовами експлуатації такої системи. В основі всього лежить добове споживання електроенергії, яке може значно варіюватися залежно від типу об’єкта: житловий будинок, офіс, фермерське господарство або промисловий об’єкт.

Житлові будинки, як правило, споживають у межах 5–15 кВт·год на добу, особливо в разі переходу на електроопалення, використання теплових насосів, електричних плит та побутових приладів. Якщо розглядати енергонезалежне помешкання, яке не підключене до центральної електромережі, питання безперебійного енергопостачання стає критично важливим. У таких умовах паливна комірка виступає ключовим елементом, здатним забезпечити стабільну генерацію електроенергії з водню незалежно від погодних умов і часу доби.

Обсяг водню, необхідного для забезпечення такої роботи, визначається не лише середнім споживанням, а й можливими піковими навантаженнями, які мають бути враховані при проектуванні. Наприклад, короткочасне одночасне вмикання кількох потужних електроприладів може спричинити суттєве збільшення енергоспоживання, і система повинна мати достатній запас водню для забезпечення такого навантаження. Особливо важливо це у зимовий період, коли збільшується споживання електроенергії на освітлення, обігрів та вентиляцію.

Також необхідно враховувати особливості самої паливної комірки. Різні типи паливних елементів мають різну ефективність, термін служби, вимоги до чистоти водню та режиму роботи. Наприклад, комірки типу PEMFC, які найчастіше використовуються в автономних системах, забезпечують високу чистоту енергії, але є чутливими до забруднень і потребують стабільного тиску та температури. Це означає, що система зберігання водню повинна бути доповнена засобами очищення та стабілізації параметрів газу.

Ще один важливий аспект – тривалість автономної роботи. Якщо система призначена для роботи в умовах періодичної генерації від відновлюваних джерел, наприклад, сонячної енергії, то має сенс накопичувати водень у періоди надлишкової генерації для подальшого використання. Це дозволяє створити буфер, який забезпечить безперебійну роботу у вечірній час або в похмурі дні. У такому разі обсяг накопиченого водню має враховувати не лише добові потреби, а й погодні коливання, сезонність і можливі перебої у генерації.

Зберігання водню в автономних системах також вимагає окремого розгляду. Водень може зберігатися у стисненому, рідкому або абсорбованому стані. Кожен метод має свої переваги і недоліки. Наприклад, стиснення до високого тиску дозволяє зберігати більший об’єм у менших резервуарах, але вимагає додаткових енергетичних витрат та дотримання суворих норм безпеки. Рідкий водень має вищу енергетичну густину, але потребує охолодження до наднизьких температур. Металогідридне зберігання, хоч і забезпечує вищий рівень безпеки, є дорогим і має обмежену швидкість віддачі водню.

Усі ці фактори мають бути інтегровані в систему керування енергетичним комплексом. Сучасні технології дозволяють реалізовувати розумні системи моніторингу, які автоматично регулюють подачу водню в паливну комірку, контролюють тиск, температуру і стан резервуарів, а також прогнозують енергоспоживання на основі історичних даних.

У результаті правильного розрахунку необхідної кількості водню забезпечується не лише безперебійна робота автономної системи, а й досягається економічна доцільність. Перевищення обсягів зберігання призводить до зайвих витрат, тоді як недостатній запас водню може спричинити енергетичну нестабільність або аварійне вимкнення обладнання.

Загалом, ефективне функціонування автономної системи на базі паливної комірки можливе лише за умови комплексного підходу до розрахунків, включаючи визначення потреб, вибір типу паливної комірки, проєктування системи зберігання водню та забезпечення стабільної роботи всієї інфраструктури.

Для практичного обґрунтування наведемо приклад розрахунку для типового домогосподарства, що має добове споживання електроенергії на рівні 12 кВт·год. Система енергозабезпечення базується на паливній комірці з коефіцієнтом корисної дії 50%.

Загальний обсяг енергії, який необхідно згенерувати паливною коміркою, становить 12 кВт·год на добу. Оскільки ККД паливної комірки дорівнює 50%, фактична кількість енергії, яку потрібно отримати з водню, буде вдвічі більшою — 24 кВт·год.

Енергетична цінність водню дорівнює приблизно 33,3 кВт·год на 1 кг. Відповідно, добова потреба у водні визначається шляхом ділення загального енергоспоживання на цей показник:

24 кВт·год ÷ 33,3 кВт·год/кг = 0,72 кг водню на добу.

Цей обсяг забезпечує стабільну роботу системи при типовому споживанні. Якщо ж планується створити запас на тиждень без генерації (наприклад, у випадку несприятливих погодних умов для сонячної чи вітрової генерації), то необхідно передбачити такий обсяг:

0,72 кг/добу × 7 днів = 5,04 кг водню на тиждень.

Аналогічно, для місячного запасу:

0,72 кг/добу × 30 днів = 21,6 кг водню на місяць.

У випадку, якщо об’єкт має підвищене споживання — наприклад, 20 кВт·год на добу — обчислення виглядатиме так:

Необхідна енергія: 20 ÷ 0,5 = 40 кВт·год.

Необхідна маса водню: 40 ÷ 33,3 ≈ 1,20 кг водню на добу.

На тиждень:

1,20 × 7 = 8,4 кг.

На місяць:

1,20 × 30 = 36 кг.

Ці розрахунки демонструють, що навіть для відносно поміркованого рівня енергоспоживання кількість водню, необхідна для забезпечення автономної роботи системи, є відчутною. Це підкреслює важливість оптимального проектування резервуарів для зберігання, врахування умов безпеки, а також економічної доцільності обраної архітектури системи.

ВИСНОВКИ

В роботі розглянуто актуальну проблему створення автономної системи енергозабезпечення споживача на основі водневих технологій.

Проведений огляд типів електролізерів, які використовуються для генерації водню з води за допомогою електроенергії, дозволив виділити чотири основних типи: лужні (AWE), електролізери з протонообмінною мембраною (PEM), тверді оксидні електролізери (SOE) та електролізери з аніонообмінною мембраною (AEM). Детальний аналіз їх ефективності, технічних характеристик, діапазонів температур і тисків, дозволив встановити особливості їх експлуатації та відповідність різним типам енергетичних систем. Зокрема, можна заключити, що електролізери типу PEM мають найкраще співвідношення між ефективністю, гнучкістю до змін у генерації енергії та адаптивністю до відновлюваних джерел, що робить їх найбільш придатними для автономних побутових систем.

Аналіз ключових особливостей паливних комірок, які забезпечують перетворення хімічної енергії водню на електроенергію привів до висновку, що комірки типу PEMFC мають достатньо високий ККД, низьку робочу температуру, екологічність та здатність до роботи в динамічному режимі, що важливо для непостійних побутових навантажень.

На підставі проведеного розрахунку енергоспоживання типового домогосподарства, що включає електроприлади (холодильник, комп’ютер, освітлення, бойлер, електроплита, телевізор, вентиляція, система безпеки тощо) встановлено, що добове споживання становить 11,64 кВт·год, що з урахуванням ККД паливної комірки 50% вимагає 0,70 кг водню на добу. Для забезпечення тижневої автономності необхідно 4,9 кг водню, а на місяць - близько 21 кг. Визначено, що потужність паливної комірки для забезпечення пікових навантажень повинна бути не менше 5,5 кВт.

Отримані результати дозволяють стверджувати, що воднева енергетика є життєздатним рішенням для автономного живлення приватних будинків, особливо в умовах енергетичних обмежень або у віддалених регіонах.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ

1. D.Agrawal, N. Mahajan, S.A. Singh, I. Sreedhar, Green hydrogen production pathways for sustainable future with net zero emissions. Fuel, 359(1) 2024, 130131.
2. L.Zhang, Jia C, Fuqiao Bai, Wang W, Senyou AN, Kaiyin Zhao, et al. A comprehensive review of the promising clean energy carrier: Hydrogen production, transportation, storage, and utilization (HPTSU) technologies. Fuel. 2024; 355: 129455.
3. T.Smolinka, H Bergmann, J Garche, M Kusnezoff. The history of water electrolysis from its beginnings to the present. Electrochemical Power Sources: Fundamentals, Systems, and Applications. 2022; 83-164.
4. L.Fan, Z Tu, SH Chan. Recent development of hydrogen and fuel cell technologies: A review. Energy Reports. 2021; 7: 8421-8446.
5. N.Goodarzi, Ashrafi-Peyman Z, Khani E, Moshfegh AZ. Recent progress on semiconductor heterogeneous photocatalysts in clean energy production and environmental remediation. Catalysts. 2023; 13: 1102.
6. X.Li, Zhao L, Yu J, Liu X, Zhang X, Liu H, et al. Water splitting: From electrode to green energy system. Nanomicro Lett. 2020; 12: 131.
7. A.Franco, Giovannini C. Recent and future advances in water electrolysis for green hydrogen generation: Critical analysis and perspectives. Sustainability. 2023; 15: 16917.
8. H.Zhang, Sun Z, Hu Y H. Steam reforming of methane: Current states of catalyst design and process upgrading. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2021; 149: 111330.
9. H.Cho, Strezov V, Evans TJ. Environmental impact assessment of hydrogen production via steam methane reforming based on emissions data. Energy Reports. 2022; 8:13585-13595.

10. M.Katebah, Al-Rawashdeh M, Linke P. Analysis of hydrogen production costs in steam-methane reforming considering integration with electrolysis and CO2 capture. Cleaner Engineering and Technology. 2022; 10: 100552.
11. J.Bora, Ghosh S, Mitra A. Photobiological hydrogen production by microorganisms. Solar-Driven Green Hydrogen Generation and Storage. 2023; 237-257.
12. R.Sivaramakrishnan, Shanmugam S, Sekar M, Mathimani T, Incharoensakdi A, Kim SH. et al. Insights on biological hydrogen production routes and potential microorganisms for high hydrogen yield. Fuel. 2021; 291: 120136.
13. H.Ayub, Alnouri SY, Stijepovic MZ, Stijepovic V, Hussein IA. A cost comparison study for hydrogen production between conventional and renewable methods. Process Safety and Environmental Protection. 2024; 186: 921-932.
14. Q.Hassan, Algburi S, Zuhair A, Jaszczur M, Salman HM. Hydrogen as an energy carrier: Properties, storage methods, challenges, and future implications. Environmental Systems Decisions. 2023; 44: 1-24.
15. Н.А. Чорна. Перспективи застосування водневих технологій для автономних енергетичних комплексів на основі відновлюваних джерел енергії. Відновлювана енергетика. 2019; 3; 18-32.
16. T.Zhang, Uratani J, Huang Y, Xu L, Griffiths S, Ding Y. Hydrogen liquefaction and storage: Recent progress and perspectives. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2023; 176: 113204.
17. N. Klopčič, Grimmer I, Winkler F, Sartory M, Trattner A. A review on metal hydride materials for hydrogen storage. Journal of Energy Storage. 2023; 72: 108456.
18. Q.Hassan, Sameen AZ, Salman HM, Jaszczur M, Al-Jiboory AK. Hydrogen energy future: Advancements in storage technologies and implications for sustainability. Journal of Energy Storage. 2023; 72:108404.

19. A.Aghakhani, Haque N, Saccani C, Pellegrini M, Guzzini A. Hydrogen transportation and distribution Towards Hydrogen Infrastructure. Towards Hydrogen Infrastructure. 2024; 187-224.
20. M.Yue, Lambert H, Pahon E, Roche R, Jemei S, Hissel D. Hydrogen energy systems: A critical review of technologies, applications, trends and challenges. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2021; 146: 111180.
21. M.Tellez-Cruz, Escorihuela J, Solorza-Feria O, Compañ V. Proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs): Advances and challenges. Polymers. 2021; 13: 3064.
22. J.Manna, Jha P, Sarkhel R, Banerjee C, Tripathi AK, Nouni MR. Opportunities for green hydrogen production in petroleum refining and ammonia synthesis industries in India. International Journal of Hydrogen Energy. 2021; 46: 38212-38231.
23. R.Wang, Zhao YQ, Babich A, Senk D, Fan XY. Hydrogen direct reduction (H-DR) in steel industry—An overview of challenges and opportunities. Journal of Cleaner Production. 2021; 329: 129797.
24. C.Mendez, Contestabile M, Bicer Y. Hydrogen fuel cell vehicles as a sustainable transportation solution in Qatar and the Gulf cooperation council: A review. International Journal of Hydrogen Energy. 2023;48: 38953-38975.
25. Q.Hassan, Azzawi IDJ, Sameen AZ, Salman HM. Hydrogen fuel cell vehicles: Opportunities and challenges. Sustainability. 2023; 15: 1-26.
26. S.Yu, Fan Y, Shi Z, Li J, Zhao X, Zhang T, Chang Z. Hydrogen-based combined heat and power systems: A review of technologies and challenges. International Journal of Hydrogen Energy. 2023; 48:34906-34929.
27. ВОДНЕВА СТРАТЕГІЯ УКРАЇНИ на період до 2050 року, ПРОЄКТ, https://www.mev.gov.ua/sites/default/files/field/file/vodneva-strategiya17.05.2024.pdf

28. О.О. Зеленько, Гуцан Т.Г., Осьмірко І.В. Воднева енергетика та перспективи її розвитку в економіці України. Бізнес Інформ. 2022. № 8. С. 20-26.
29. IEA. 2022. Electrolysers. Paris: International Energy Agency. https://www.iea.org/reports/electrolyser
30. A. Lavacchi, K.Bouzek, J.Hnát, S.Loos, C.Müller, T.Weißgärber, L.Röntzsch, J. Meier-Haack. 2020. Green Hydrogen from Anion Exchange Membrane Water Electrolysis: A Review of Recent Developments in Critical Materials and Operating Conditions." Sustainable Energy and Fuels 4 (5): 2114–33.
31. S.Kumar, V. Himabindu. 2019. Hydrogen Production by PEM Water Electrolysis – A Review. Materials Science for Energy Technologies 2 (3): 442–54.
32. M.Tellez-Cruz, J. Escorihuela , O. Solorza-Feria, V. Compañ. Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFCs): Advances and Challenges. Polymers (Basel) 2021, 13(18):3064.
33. International Journal of Hydrogen Energy
34. M.Singh, D.Zappa, E.Comini. Solid oxide fuel cell: Decade of progress, future perspectives and challenges. International Journal of Hydrogen Energy, 46(54), 2021, 27643-27674.
35. Phosphoric Acid Fuel Cell Market Size, Share & Trends. Analysis Report By Application (Vehicles, Cogeneration, Others), By Region (North America, Europe, Asia Pacific, Middle East & Africa), And Segment Forecasts, 2024 – 2030.
36. A.Hamada, M.Orhan, A.Kannan. Alkaline fuel cells: Status and prospects. Energy Reports, 9, 2023, 6396-6418.
37. B.Garcia, V.Sethuraman, J.Weidner, R.Dougal, R.White. Mathematical Model of a Direct Methanol Fuel Cell. Journal of Fuel Cell Science and Technology, 1 (1), 43-48, 2004.