

СТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота

на правах рукопису

Древіцький Сергій Вікторович

УДК 621.359.4

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Ефективність акумулювання електричної енергії і водню в енергосистемах з

ВДЕ

(тема роботи)

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня бакалавр

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

Древіцький С. В.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Островерхов Микола Якович

(прізвище, ім'я, по батькові)

д.т.н., професор кафедри електрифікації,
автоматизації виробництва та інженерної екології

(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2026

АНОТАЦІЯ

Древіцький С. В. Ефективність акумулювання електричної енергії і водню в енергосистемах з ВДЕ. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня бакалавр за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – Поліський національний університет, Житомир, 2026.

Мета роботи є дослідити енергосистему, що має вітроелектричні установки, фотоелектричні перетворювачі, електролізер для виробництва водню, паливні елементи, для визначення ефективності акумулювання електричної енергії та водню та визначити перспективи розвитку водневої енергетики

Ключові слова: водень, паливний елемент, відновлювальна енергетика.

ABSTRACT

Drevitskyi S. V. Efficiency of accumulation of electric energy and hydrogen in power systems with renewable energy sources. Qualification work for obtaining a bachelor's degree in specialty 141 - Electric power, electrical engineering and electromechanics - Pollessia National University, Zhytomyr, 2026.

The purpose of the work is to investigate a power system that has wind power plants, photovoltaic converters, an electrolyzer for hydrogen production, fuel cells, to determine the efficiency of accumulation of electric energy and hydrogen and to determine the prospects for the development of hydrogen energy

Keywords: hydrogen, fuel cell, renewable energy.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. ПРИЧИНИ ЗРОСТАННЯ ІНТЕРЕСУ ДО ВОДНЕВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ	7
1.1 Огляд тенденцій які визначили зростання інтересу до водневої енергетики	7
1.2 Перспективи розвитку водневої енергетики	10
Висновки по розділу 1	18
РОЗДІЛ 2. ОСОБЛИВОСТІ ОДЕРЖАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ІЗ ВОДНЮ	19
2.1. Електрокаталізатори для паливних елементів	19
2.2 Матеріали для середньо- і високотемпературних паливних елементів	22
Висновки по розділу 2	24
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ АКУМУЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ І ВОДНЮ У ЕНЕРГОСИСТЕМАХ З ВІДНОВЛЮВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ	25
3.1 Вибір моделі розрахунку режимів роботи та економічних характеристик енергосистеми	25
3.2 Результати розрахунків для оцінки ефективності системи виробництва та акумулювання водню та їх аналіз	30
Висновки по розділу 3	34
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	34
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	36

ВСТУП

Енергія - один з найбільш затребуваних продуктів, без якого неможливі жодне виробництво і робота різноманітних приладів, що визначають побут і навіть стиль життя сучасної людини. Донедавна споживання енергії в світі подвоювалося в середньому кожні 30 років. Тривале час основним джерелом енергії була деревина, яку лише наприкінці XIX ст. змінило вугілля, а його у свою чергу на початку 1950-х років – нафта. Усі ці зміни були зумовлені суто економічною доцільністю та ефективністю використання палива. Але, незважаючи на все переваги, лідируюче становище нафти менш однозначно – їй належить менше третини у виробництві первинної енергії. І вже зараз встає питання про потреби переходу на нові альтернативні джерела енергії. Важливо відзначити, що це питання диктується вже не економікою, а екологічними причинами.

Перед людством стоїть масштабна і складна задача переходу до сталого розвитку. Стосовно енергетики, цей перехід вимагає розробки та впровадження нових енергетичних технологій, що дозволяють підвищити ефективність використання енергетичних ресурсів за рахунок відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та обмежити негативний вплив енергетики на клімат, природу і здоров'я людей.

Установки, що використовують вітрову та сонячну енергію, працюють у некерованому режимі: їх потужність змінюється випадковим чином у зв'язку зі стохастичним характером природних процесів. Їх об'єднання з акумуляторами електричної енергії або з водневою системою (електролізер, ресивер і паливні елементи), яка акумулює енергію у вигляді запасу вторинного енергоносія (водню), дозволяє забезпечити надійне електропостачання споживачів відповідно до графіка їх навантаження.

Воднева енергетика — це наш «запас на майбутнє», коли від викопного палива доведеться остаточно відмовитися, а відновлювані джерела енергії не зможуть покривати потреби людства. Згідно з прогнозом Markets&Markets, обсяг світового виробництва водню, який зараз становить \$115 млрд, до 2028

року зросте до \$154 млрд. Але в найближчому майбутньому масове впровадження технології навряд чи відбудеться, необхідно ще вирішити ряд проблем, пов'язаних з виробництвом та експлуатацією спеціальних енергоустановок, знизити їх вартість. Коли технологічні бар'єри будуть подолані, воднева енергетика вийде на новий рівень і, можливо, буде так само поширена, як сьогодні традиційна або гідроенергетика.

Відповідно до вище вказаного **метою даної роботи** є дослідити енергосистему, що має вітроелектричні установки, фотоелектричні перетворювачі, електролізер для виробництва водню, паливні елементи, для визначення ефективності акумулювання електричної енергії та водню.

Методи дослідження. На основі математичного моделювання обрано оптимальну структуру енергосистеми та досліджено в динаміці режими роботи джерел і накопичувачів енергії. На відміну від відомих у літературі підходів, використана математична модель не потребує попереднього задання режимів роботи елементів системи або алгоритму перемикання енергії між енергоджерелами, навантаженням та акумуляторами. Це дозволяє досліджувати складні енергосистеми з одночасним виробництвом та акумулюванням енергоносіїв різних типів, в даному випадку електроенергії та водню.

Перелік публікацій автора за темою дослідження:

Стафій М. В. ВИКОРИСТАННЯ БІОГАЗУ В ЯКОСТІ ПАЛИВА ГАЗОПОРШНЕВИХ ДВИГУНІВ ДЛЯ ВИРОБЛЕННІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ
Матеріали науково-практичної конференції факультету інженерії та енергетики «НАУКОВІ ЧИТАННЯ за підсумками І-го туру Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей» 29 квітня 2026 року. Житомир: Поліський національний університет, 2026.- С 195-198.

Каленська А. Ю., Стафій М. В. МІКРОМЕРЕЖА НА ОСНОВІ ВДЕ ЯК ІНСТРУМЕНТ РІЗНИХ ГЕНЕРУЮЧИХ ДЖЕРЕЛ В СІЛЬСЬКОМУ ГОСПОДАРСТВІ

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

РОЗДІЛ 1

ПРИЧИНИ ЗРОСТАННЯ ІНТЕРЕСУ ДО ВОДНЕВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

1.1 Огляд тенденцій які визначили зростання інтересу до водневої енергетики

Виробництво енергії з вуглевмісної сировини пов'язане із забрудненням навколишнього середовища. Незважаючи на те що побоювання людства щодо шкоди CO_2 не настільки однозначні, шкода оксидів азоту, що попутно утворюються, і сірки очевидна. Тому актуальне питання про те, які джерела енергії домінуватимуть, можливо, вже до середини нинішнього століття. Згідно з директивами розвитку енергетики в розвинених країнах, це будуть відновлювані джерела енергії (ВДЕ), серед яких можна виділити сонячні батареї, вітрогенератори, енергію припливів та відливів. Однак можливість застосування цих джерел обмежена тривалістю і стохастичністю природних явищ, тому для забезпечення безперебійного енергопостачання необхідно паралельне використання накопичувачів енергії, серед яких найбільш перспективними можна рахувати метал-іонні акумулятори, редокс-батареї і водневий цикл. Враховуючи процеси саморозряду, які протікають в акумуляторах, не можна розраховувати на них з точки зору тривалого зберігання енергії, одержаних від відновлюваних енергоджерел, наприклад для погашення дисбалансу виробництва енергії та її споживання в літні і зимові місяці, а також в періоди несприятливих метеоумов.

Паливні елементи (ПЕ), за допомогою яких одержують енергію за рахунок окислення водневмісного палива киснем, також можуть розглядатися в якості відновлюваних джерел енергії при використанні водню, одержуваного конверсією біомаси, або зі спиртів. Варто наголосити, що на відміну від більшості пристроїв, генеруючих енергію, ПЕ є екологічно чистими (продукт їх роботи - лише вода) і високоефективними. Для енергопостачання віддалених регіонів, польових робіт і транспортних засобів використання водню у світлі тенденції до декарбонізації енергетики - одне із найкращих рішень.

Відзначені тенденції визначили зростання інтересу до водневої енергетики, який реалізується в програмах її розвитку, прийнятих рядом розвинених країн, у тому числі і в нашій державі. Ці програми включають виробництво ПЕ і різних пристроїв на їх основі, в зокрема транспортних засобів. Передбачено розвиток інфраструктури для водневої енергетики, складові частини якої є системи для заправки водню, його зберігання і виробництва.

Слід відзначити, що спроба широкого впровадження водню в енергетику робиться не вперше. Водень і водневмісні гази, одержувані переважно шляхом газифікації дерев'яного і кам'яного вугілля, з XIX в. у досить великих об'ємах використовували для газового освітлення міст, у двигунах внутрішнього згоряння автомобілів, в промисловості. У 80-х роках минулого століття інтерес до водню відродився у зв'язку з побоюваннями виснаження запасів нафти на планеті. Було запропоновано замінити нафтопродукти воднем, який отримується з вугілля або з використанням ядерної енергії, ресурсів яких на порядки більше, ніж нафти. Однак пізніше було показано, що темпи зростання глобального попиту на моторні палива будуть сповільнюватися, а запасів нафти достатньо для забезпечення потреб людства на оглядову перспективу.

Основними геополітичними факторами, які визначили причини відродження інтересу до водневої енергетики, стали наступні:

- реалізація вимог Маризької угоди щодо збереження клімату від 12 грудня 2015 р.;
- прагнення країн-імпортерів вуглеводнів кардинально знизити свою залежність від зарубіжних постачальників ;
- формування глобального ринку обладнання для використання відновлюваних джерел енергії.

Відповідно до Паризької угоди потрібно утримання приросту глобальної середньої температури не більше 2°C понад доіндустріального рівень. Ця вимога реалізується шляхом скорочення споживання енергії (енергозбереження) і «декарбонізації» енергетики та економіки. Останнє

передбачає витіснення викопних палив відновлюваних джерел енергії і перехід до використання безвуглецевих енергоносіїв, насамперед водню .

Згідно з оцінками,[3] для виконання Паризької угоди знадобиться дворазове скорочення викидів CO_2 до 2040 р. і перехід вперше в історії розвитку людства на низхідну траєкторію енергоспоживання. Це надзвичайно складні завдання, вирішити які без нових технологій у принципі неможливо. Ключову роль у створенні таких технологій відіграватимуть нові матеріали, як функціональні, так і конструкційні, в том числі і для водневої енергетики Вони повинні допомогти підвищити ефективність обладнання, подовжити термін його служби і знизити вартість. Цій проблемі присвячено кілька оглядів, що вийшли протягом останніх півтора року. [3] Однак для створення кожного з пристроїв, задіяних у водневій енергетиці, необхідний певний набір матеріалів, від ступеня досконалості яких залежить ефективність реалізації конкретної технології. Тому для успішного розвитку водневої енергетики необхідно вирішити ряд матеріалознавчих завдань, пов'язаних з отриманням нових матеріалів і оптимізацією їх властивостей. Узагальнюючих публікацій з цього актуального напрямку в літературі не було.

Метою даного огляду є поширення перспектив розвитку водневої енергетики та створення основних типів матеріалів, які можуть використовуватися для становлення даного напрямку, включаючи отримання, очищення, зберігання водню та його перетворення в енергію (рис.1.1).

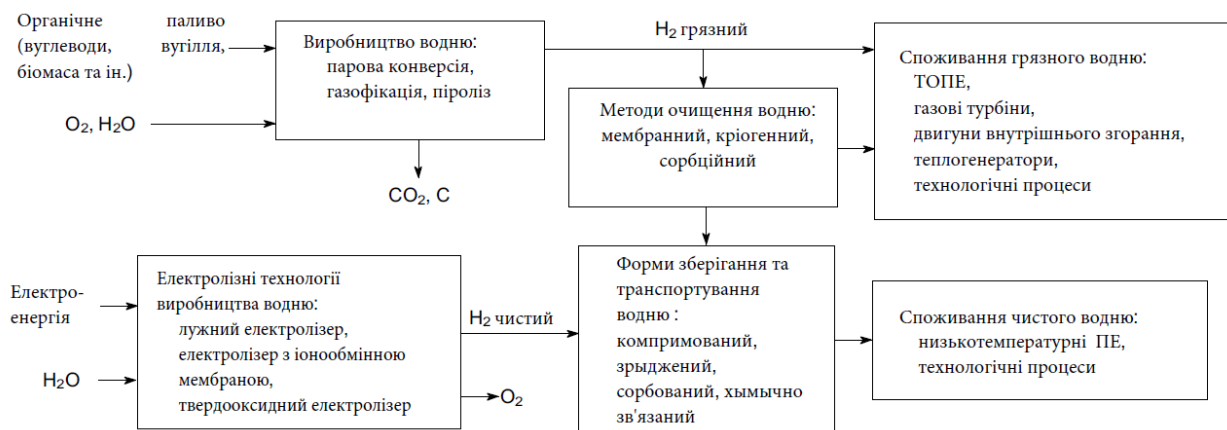


Рисунок 1.1. Основні напрямки водневий енергетики. ТОПЕ - твердооксидний паливний елемент

1.2 Перспективи розвитку водневої енергетики

В даний час світове споживання водню становить ~ 115 млн т на рік (табл. 1.1). З них 70 млн т водню використовують у вигляді індивідуальної речовини, в основному, для виробництва аміаку і в нафтопереробці, ще ~ 45 млн т - в суміші з різними газами для виробництва метанолу, прямого відновлення металів та ін. Частка водню в світовому споживанні кінцевої енергії становить $\sim 3\%$. Для енергетичних цілей водень поки що практично не застосовують з економічних міркувань.

Загальне виробництво водню, одержуваного з природного газу і вугілля, складає 76 і 23% відповідно. Ще $\sim 1\%$ водню складає в основним побічний продукт електролізу лугів при виробництві хлору і каустичної соди, і лише 0.1% водню отримують електролізом води. По оцінкам, річне споживання водню в світі 2050 може зрости в 6 раз — майже до 700 млн т при проведенні «жорсткої» кліматичної політики, що забезпечує стримування підвищення температури[2]. В цьому випадку частка водню в світовому споживанні кінцевої енергії досягне 24% (див. табл. 1.1). Пріріст попиту на водень, як очікується, буде відбуватися в основним за рахунок його споживання на транспорті і в електроенергетиці, причому передбачається використовувати водень для виробництва пікової електроенергії, що важливо при великій частці ВДЕ в структурі генеруючих потужностей. У такому випадку водень виробляється шляхом електролізу води на базі електроенергії від ВДЕ і служить в якості проміжного накопичувача енергії з її наступним використанням у ПЕ. Для реалізації даних планів потрібні гігантські інвестиції - до 11 трлн дол. США в цілях створення водневої інфраструктури, що включає виробництво, транспорт і зберігання водню. Оцінка граничного об'єму попиту на водень до 2050 м. складає 1370 млн т на рік або 49% від світових потреб в кінцевій енергії.

Таблиця 1.1. Прогноз світового споживання водню до 2050 р., млн т H_2 на рік[1].

Область споживання	Сучасне споживання	Прогнозоване споживання	Максимальний об'єм
Промисловість	115	123	301
Транспорт	0	301	524
Електроенергетика	0	219	439
Теплопостачання будівель	0	53	106
Усього	115	696	1370
Частка водню в світовому споживанні кінцевої енергії, %	3	24	49

При цьому передбачається повне заміщення органічних палив на транспорті, в промисловості, енергетиці і житлово-комунальному господарстві в тих процесах, де це технологічно можливо.

У відповідно з публікацією [23] світовий попит на чистий водень оцінений найменшою величиною і складає ~ 280 тлн т до 2050 р. і 520\млн т до 2070 р. При цьому ~ 30% водню буде споживатися наземним транспортом, 20% використовуватися для виробництва авіаційного гасу разом з CO₂, 10% прямувати на синтез аміаку з його наступним застосуванням в якості палива на морському транспорті, 15% використовуватися в хімічній промисловості та металургії, 15% - для вироблення пікової електроенергії, 5% - для опалення будівель та гарячого водопостачання споживачів, решта 5% - на інші потреби. Мається на увазі, що ~ 40% водню буде вироблятися на основі органічних палив з уловлюванням CO₂ і 60% - шляхом електролізу води.

Основні компоненти водневої енергетики представлені на рис. 1.1. При проведення жорсткої кліматичної політики воднева енергетика буде в значній мірі базуватися на безвуглецевих джерелах первинної енергії - ВДЕ, ядерної енергії і виробництві водню шляхом електролізу води. При використанні органічних палив буде потрібна надійна утилізація великих об'ємів CO₂ - його корисне застосування або поховання, що пов'язане зі значними економічними і технологічними проблемами.

Для України обґрунтування доцільності, масштабів і напрямів розвитку водневої енергетики повністю актуально. У Єдиній енергетичній системі країни є великий надлишок генеруючих потужностей - близько 10 ГВт понад необхідні 55 – 60 ГВт для покриття річного максимуму навантаження та 15

ГВт для забезпечення резерву[20]. У основним це фізично і морально застаріле обладнання. Приняті програми його модернізації. Але в більшості випадків модернізація полягає в заміні застарілого обладнання на аналогічне. Альтернативою міг б стати перехід до водневої енергетики. Однак країна до такого переходу поки не готова через відсутність відповідних вітчизняних технологій. Велико-масштабне використання зарубіжного обладнання суперечить вимогам наявних коштів.

Для розвитку водневий енергетики можуть з'явитися і економічно обумовлені причини. У даний час спостерігається процес зміни структури попиту на енергію під впливом технологічної революції та соціально-економічних факторів. Концентрація населення і бізнесу у великих містах і міських агломераціях призводить до швидкого збільшення навантажень на систему енергопостачання і транспорт. Щільність електроспоживання в мегаполісі досягає $(5 - 10) \cdot 10^3$ МВт-год $\cdot$ км² в рік і більше. Це створює як серйозні екологічні проблеми, так і складності з введенням великих потоків електроенергії.

Додаткові проблеми виникають при масовому застосуванні електромобілів. У тому числі кратно зростання попиту на електроенергію, зміну режимів її споживання, необхідність спорудження розгалуженої мережі станцій, які можуть включати електрохімічні акумулятори великої потужності і ємності і ПЕ на водні. Електрохімічні акумулятори можуть витіснити вуглеводні з легкового автотранспорту, а ПЕ на водні з важкого вантажного і пасажирського, а також з залізничного, річкового і морського транспорту. У зокрема, компанією Daimler Trucks розробляється 40-тонна вантажівка Mercedes-Benz GenH2 Truck на водневих ПЕ із запасом ходу 1000 км на одній заправці (80 кг рідкого водню). Ведуться розробки і легкових автомобілів на водні. Так, компанія Toyota вивела на ринок водневий автомобіль Mirai другого покоління, здатний на однієї заправки (5.6 кг водню) подолати відстань 850 км. Формується воднева інфраструктура. Компанією Toshiba запропоновано технологія мультимодальних водневих та електрозаправних

станцій (H2One™ Multi Station), відповідно до якої водень виробляється електролізом води за рахунок електроенергії, яка отримується від ВДЕ[21].

Паливні елементи є ключовою технологією, що виправдовує перехід до водневої енергетики з енергетичної і економічної точок зору. У багатьох країнах розробка ПЕ підтримується на державному рівні. Так, основним елементом Національної водневий стратегії Німеччини стала багатомільярдна «Національна інноваційна програма в галузі технологій водневих і паливних елементів». Активно розробки ПЕ ведуться в США, Японії, Південної Кореї і во багатьох інших країнах. Маються відповідні національні програми. При державній підтримці створюються демонстраційні зони з метою апробації ПЕ різних конструкцій в реальних умовах експлуатації та демонстрації можливостей технології для прискорення формування відповідного ринку. По цьому ж шляхи йде Німеччина, де починають створюватися «водневі регіони» (HyLands), покликані прискорити розробку та ринкове впровадження ПЕ та інших водневих технологій.

Головними конкурентними перевагами електрогенеруючих установок з ПЕ є їх висока енергетична ефективність, надійність, практична відсутність шкідливих викидів, безшумність і можливість тривалої роботи в необслуговуваному режимі з дистанційним контролем параметрів. По цим причинам немає значних обмежень для розміщення ПЕ безпосередньо у споживачів, що робить їх перспективними технологіями для розподіленої генерації. Зіставлення доступних у літературі даних [12] показало, що за величиною ККД у енергоустановок на ТЕ при електричній потужності до 1 МВт практично немає конкурентів (рис. 1.2) [11]. Близькі значення ККД (~60%) можуть досягатися лише кращі парогазові установки електричної потужністю 1 ГВт і більше.

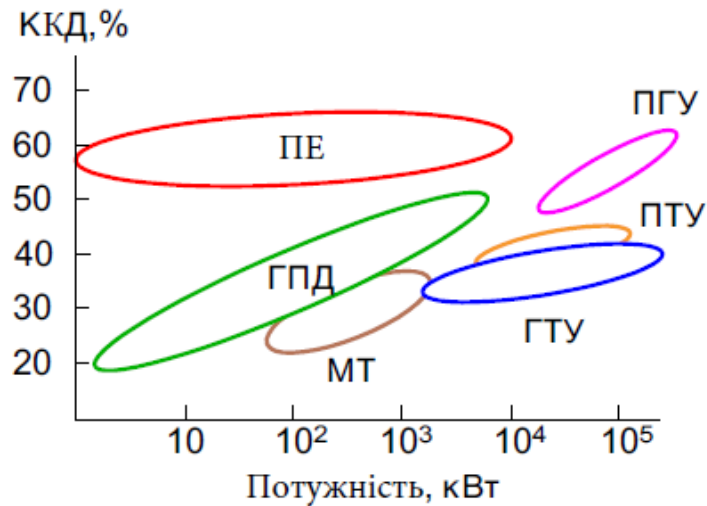


Рисунок 1.2. Области значень ККД різних технологій при номінальному навантаженні в залежності від потужності установки: ПЕ, газопоршневі двигуни (ГПД), мікротурбіни (МТ), газотурбінні установки ГТУ, паротурбінні установки (ПТУ), парогазові установки (ПГУ).

Мерспективним може виявитися комбінування ТОПЕ з газовими мікротурбінами. Відповідні гібридні установки розробляються у Японії компанією МНІ за фінансової підтримки уряду. Створено кілька демонстраційних установок електричної потужністю 250 і 1000 кВт. Поставлено завдання наблизити ККД гібридних установок до 70%.

Енергоустановки з ПЕ мають більші потенціальні можливості для вдосконалення. У відмінність від традиційних теплових машин в ПЕ знімаються обмеження циклу Карно, оскільки діють інші фізичні ліміти на максимальну енергетичну ефективність (термодинамічний ККД). Причому ці обмеження виявляються істотно менш жорсткими в низькотемпературній області, що критично важливо для перспективних енергетичних установок.

Паливні елементи характеризуються принципово іншою залежністю термодинамічного ККД від температури процесу, що впливає з термодинамічних розрахунків, виконаних на основі даних роботи [15] (рис. 1.3). З пониженням температури ККД збільшується, що дуже сприятливо з точки зору практичного застосування ПЕ в енергетиці: вище потенційний електричний ККД, нижче вимоги до конструкційних матеріалів, більший

робочий ресурс, вище надійність. Для ефективної утилізації тепла газів для цілей теплопостачання достатньо їх температури порядку 120–150°C. При даній температурі туртодинамічний коефіцієнт корисної дії ПЕ перевищує 90%. У таких умовах ККД теплових машин не досягає і 30%. Отже, магістральний напрямком у розробці ПЕ для стаціонарної енергетики має стати зниження температури робочого процесу при збереженні інших експлуатаційних характеристик енергоустановки.

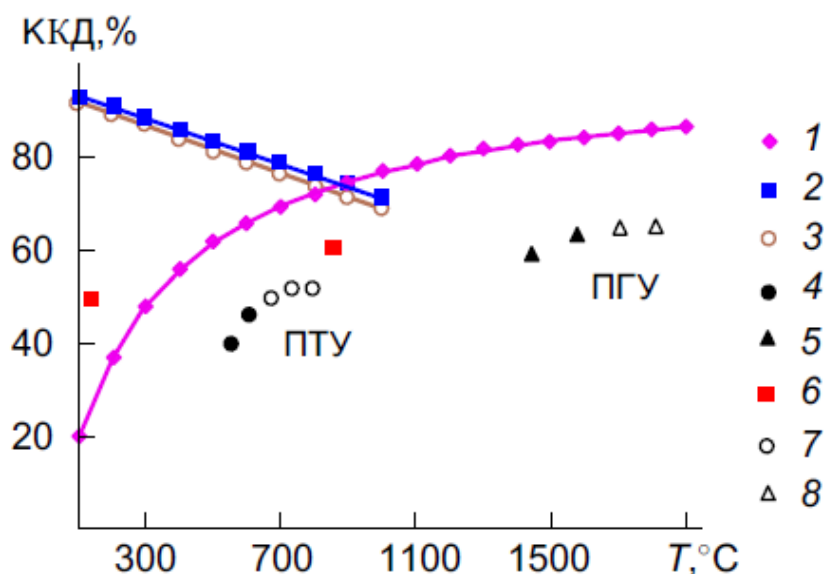


Рисунок 1.3. Теоретично розраховані (граничні) значення термодинамічного ККД теплових машин (цикл Карно) (1) і ПЕ на водні (2) і продуктах конверсії метана (СО-водневої суміші) (3) в залежності від температури, експериментально досягнуті значення ККД для ПТУ (4) , ПГУ (5) і ПЕ (6) , а також очікувані значення знаходять ПТУ (7) та ПГУ (8). Значення теродинамічних ККД для ПЕ визначали як відношення енергії Гіббса до повної ентальпії системи при заданій температурі, для традиційних установок як відношення різниці температур підведення і відведення тепла до температури підведення тепла.

Значення ККД при номінальному навантаженні для енергоустановок на низькотемпературних і високотемпературних ПЕ на рис. 1.3 зіставлені з ККД кращих сучасних і перспективних паротурбінних і парогазових енергоустановок. Слід звернути увагу на принципову відмінність залежності

електричного ККД від навантаження для традиційних технологій і низькотемпературних ПЕ (Рис. 1.4). У традиційних енергоустановок ККД зі зниженням навантаження істотно зменшується, тоді як у низькотемпературних ПЕ він зростає. Якщо врахувати, що в реальних умовах експлуатації енергоустановки більшу частину годин працюють у режимі неповного навантаження, то цей факт має принципове значення. В даний час середньорічне завантаження обладнання теплових електростанцій країни складає 43.9%, у тому числі великих газових електростанцій - 49.8%, міських теплоелектроцентралей - 47.3%, установок розподіленої електрогенерації потужністю > 10 МВт - 38.6%, потужністю < 10 МВт - 26.5%. У енергоустановок з високотемпературними ПЕ з зменшенням навантаження електричний ККД також знижується, але менші темпами, чим у машинних технологіях. Це пояснюється збільшенням відносних теплових втрат при зниженні навантаження у таких установок.

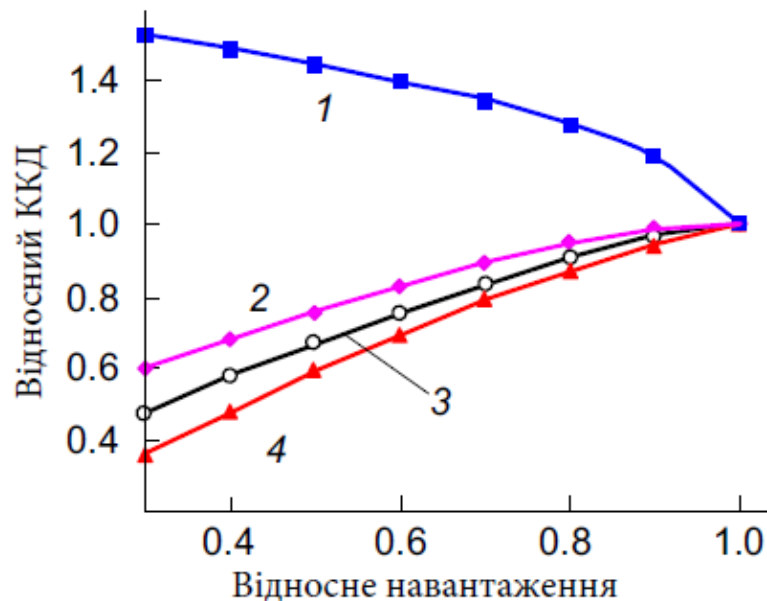


Рисунок 1.4. Залежності електричного ККД енергоустановок від навантаження: 1 - -низькотемпературні ПЕ, 2 - ТОПЕ, 3 - газопоршневий двигун, 4 - газотурбінна установка.

Другий ключовий технологією для водневої енергетики є виробництво водню. Для цього найчастіше використовують переробку вуглеводнів. Проте чистий водень виходить тільки при електролізі води. В даний час

електролізний водень в 2–4 рази дорожче за водень, вироблений з природного газу. Причини цього є висока вартість електролізерів і «безвуглецевої» електроенергії, що виробляється на базі ВДЕ та ядерної енергії. Прогрес у зниженні вартості генерації електроенергії сонячними і вітровими електростанціями очевидний. У першу чергу він досягається за рахунок розробки нових фотоелектричних, електротехнічних і конструкційних матеріалів. До 2040 м. очікується додаткове зниження вартості сонячних та вітрових електростанцій на 40 – 50%. 40 Мають бути підстави сподіватися на подальше вдосконалення атомних електростанцій та зниження вартості виробленою їми електроенергії. Немаловажну роль в цьому повинні відіграти розробки нових жароміцних і радіаційно-стійких матеріалів, які дозволять підвищити термодинамічні параметри енергетичного обладнання атомних електростанцій з відповідним. підвищенням ККД з сучасних 33 до 45 – 50%[6].

Висновки по першому розділу

В умовах посилення політики декарбонізації особливо актуальною стає розробка технологій для нової енергетики, насамперед водневої. Для успішного розвитку водневої енергетики необхідно вирішити ряд матеріалознавчих завдань, пов'язаних з отриманням нових матеріалів і оптимізацією їх властивостей.

РОЗДІЛ 2

ОСОБЛИВОСТІ ОДЕРЖАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ІЗ ВОДНЮ

Паливні елементи служать для прямого перетворення енергії окислення водневмісного палива в електроенергію. Існують кілька різновидів ПЕ, які різняться в першу чергу типом мембрани. Найбільш поширеними є низькотемпературні ПЕ з протонпровідною полімерною мембраною і високотемпературні ТОПЕ, в яких кисеньпровідна мембрана представлена керамічною пластиною. На цих основних типах ПЕ, що визначають прогрес водневої енергетики в останні роки, ми зупинимо увагу в даному огляді. Крім мембрани, ПЕ включають каталітичні та газодифузійні шари, а також біполярні пластини. З точки зору хімії і матеріалознавства основний інтерес, безсумнівно, представляють електрокаталізатори та іонопровідні мембрани.

2.1. Електрокаталізатори для паливних елементів

В даний час ~90% продажів ПЕ на світовому ринку складають низькотемпературні ПЕ. Окислювачем у яких служить кисень або повітря, паливом - високочистий водень. Вибір повітря як окислювача призводить до деякого зниженню робочої напруги, але дозволяє істотно зменшити загальну масу ПЕ. Водень подається через пористий газодифузійний анодний шар на електрокаталізатор, де залишає свої електрони



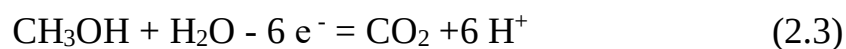
і в вигляді протонів під впливом градієнта хімічного потенціалу мігрує до катодного каталізатора, на якому протікає процес електровідновлення кисню[19].



Єдиним продуктом роботи цього екологічного джерела струму є вода. Крім того, слід відзначити високий коефіцієнт корисної дії даного пристрою. Теоретично він може перевищити 90%, але при розумних струмових навантаженнях, зниження яких для такого дорогого пристрою, як ПЕ, недоцільно, коефіцієнт корисної дії зазвичай не перевищує 50%. Приміси CO,

які присутні у водні, отриманому конверсією вуглеводнів або спиртів, в низькотемпературних ПЕ з протонпровідними мембранами сорбуються переважно на платинових каталізаторах (вкрай повільно окислюються при робочому потенціалі ПЕ), це призводить до отруєння поверхні каталізатора. Тому щільність струму в таких ПЕ різко знижується з збільшення концентрації СО у водні [19].

Як перспективне водневмісне паливо розглядається метанол, який може напружую окислятися в метанольних ПЕ, уникаючи стадії перетворення на водень



Для окислення метанолу, як і при використанні водню, зазвичай застосовують платинові або (набагато рідше) палладієві каталізатори. Ступінь заповнення поверхні каталізатора проміжними продуктами - молекулами СО в метанольних ПЕ досягає 90%, а його окислення водою протікає повільно. Це обумовлює низьку ефективність роботи метанольних ПЕ, тому вони не можуть конкурувати з водень-кисневими або водень-повітряними. Проблеми, які виникають при експлуатації етанольних ПЕ, визначаються саме сорбцією і повільним окисленням проміжних продуктів (CO_{ads}) і повністю співзвучні проблемам, що виникають у звичайних ПЕ при використанні водню, який містить примеси СО. Тому саме на їх прикладі зручно розглянути основні особливості форматування електрокаталізаторів, що використовуються для оптимізації роботи низькотемпературних ПЕ.

В якості каталізатора в низькотемпературних ПЕ з протонпровідними мембранами, незважаючи на високу вартість, практично завжди застосовують платину або її сплави, які характеризуються максимальною ефективністю при електрокаталітичних процесах в ПЕ. Багато разів намагаються замінити платину на більш дешеві перехідні метали, але їх деградація при контакті з протонпровідною мембраною призводить до швидкого отруєння останньої. З зменшенням розмірів частинок каталізатора швидкість електрохімічних процесів збільшується, що дозволяє зменшити витрати платини, однак

каталізатори з малим розміром частинок швидко деградують. Оптимальний розмір частинок платини як для катодного, так і для анодного процесів, складає 2.5–4 нм. Найбільш поширеним підходом для прискорення анодних процесів є використання сплавів платини і носіїв, які мають промотируючою дією. Так, використання сплаву Pt – Ru істотно прискорює анодні процеси. З тією ж метою застосовують і більш дешеві сплави платини з перехідними металами.

Важливо відзначити, що з введенням другого металу змінюється рівень Фермі сплаву, знижується міцність зв'язку Pt – CO_{ads}. Однак при взаємодії з протонпровідною мембраною, що має кислотну середу за рахунок присутності SO₃H-груп, активні метали здатні окислюватися, а іони що виділяються отруюють мембрану. Тому більше перспективні видаються сплави зі структурою «ядро в оболонці», в яких знаходиться на поверхні платина яка забезпечує стабільність каталізатора, а розташовані в центральній частині метали забезпечують підвищену електронну щільність на її атомах. Зокрема, представляє інтерес отримання таких каталізаторів за рахунок травлення подвійних і навіть потрійних сплавів кислотою, що видаляє активні метали з поверхні частинок каталізатора. Висловлено також припущення про те, що такі частинки можуть мати більш розвинену поверхню. Подібні проблеми виникають і при отриманні каталізаторів для електровідновлення кисню. Крім того, активність каталізатора багато в чому визначається природою використовуваного носія, який в низькотемпературних ПЕ частіше всього представлений вуглецеві матеріали, включаючи сажу, що має високу пористість, провідність і питому площу поверхні.

Електрокаталіз у ПЕ протікає на потрійних контактах платина/носій/іономер. При цьому іономер забезпечує підведення протонів, а носій - електронів до місця протікання електрохімічного процесу. Крім того, для окислення СО необхідно хімосрбція води з формуванням адсорбованих ОН-груп. При цьому реакція електроокислення тетанола (12) протікає по так названому біфункціональному технізму - посередництвом взаємодії метанола

і молекул води, хімосорбованих на металі та носіях відповідно. Повисити толерантність каталізаторів до присутності СО вдається при використанні оксидних носіїв, легко сорбуючих воду.

На жаль, платина каталізує електроокислення як водню, так і вуглецю. Внаслідок цього відбувається поступове «вигоряння» вуглецевого носія як раз по місту потрібних контактів, що призводить до втрати активності каталізатора та відриву частинок платини від носія. Тому іншою незмінною перевагою оксидних носіїв є підвищена стабільність каталізаторів на їх основі.

Так, окисленню метанолу і СО сприяє використання оксиду титану, який також прискорює і електровідновлення кисню. При цьому виявилось ефективним застосування TiO_2 у вигляді наночастинок, пористого матеріалу, нанотрубок і нановолокон. Для поліпшення електронної провідності оксиду титану використовують часткове заміщення іонів Ti^{4+} на п'ятивалентний ніобій або тантал. При цьому електрокаталітична активність систем $\text{Pt/Nb} - \text{TiO}_2$ перевершує комерційні зразки на носії у вигляді сажі[7].

Іншим поширеним носієм є оксид олова. Його популярність обумовлена легкою адсорбцією ОН-груп, формування яких при роботі ПЕ, як відзначено вище, полегшує електроокислення СО. Слід відзначити, що використання SnO_2 дозволяє досягти високої електрохімічної активності каталізаторів навіть при порівняно низькому змісті платини. До переваг оксиду олова слід віднести і наявність помітного електронного складника провідності, який можна додатково підвищити гетеровалентним допіруванням. Істотно рідше застосовують носії на основі оксидів таких металів, як церій, молібден, вольфрам і ніобій. Рядом авторів використані каталізатори на основі платини, нанесеною на карбід вольфраму з вуглецевими нанотрубками, і поліаніліном.

Для електровідновлення кисню також застосовують оксид ірідія[18]. Втім, даними системами набір електрокаталізаторів ПЕ далеко не обмежений. Легко зауважити, що вибір падає в першу чергу на матеріали, які мають власну провідність і полегшують процеси переносу, необхідні для роботи каталізатора.

Дослідження замінені платини на більш дешеві каталізатори в низькотемпературних ПЕ з протонпровідними мембранами виявилися не дуже успішними, оскільки каталітична активність інших металів зазвичай істотно нижча. Разом з тим більш активні метали взаємодіють з матеріалом протонпровідної мембрани, що являють собою сильну кислоту, істотно знижуючи його провідність. У той же час неплатинові каталізатори часто використовують у ПЕ з аніонообмінними мембранними матеріалами, корозійна активність яких виражена значно меншою мірою. Виключно неплатинові каталізатори використовують і у ТОПЕ. Поскільки вони працюють при досить високих температурах, всі проблеми, описані вище для низькотемпературних ПЕ, для ТОПЕ не є важливими. Це відноситься до більш легкості протікання процесів як електроокислення водню, так і окислення СО, які досить добре здійснюються на складнооксидних каталізаторах. Більше того, вивчається можливість прямого окислення вуглеводнів в ТОПЕ на матеріалах, які складаються з кераміки, яка включає стабілізований ітрієм оксид цирконію, оксиди міді, церію та інших металів. Найчастіше ці матеріали описують як електродні (анооди та катооди). Неплатинові каталізатори використовують також у біопаливних елементах .

2.2 Матеріали для середньо- і високотемпературних паливних елементів

Недоліки перфторованих мембран є висока вартість і зниження провідності при низькій вологості . При нагріванні $> 90^{\circ}\text{C}$ перфторовані мембрани втрачають вологу, що також призводить до зменшення провідності . Це не дозволяє використовувати їх в ПЕ при підвищених температурах. Разом з тим перехід до температур $> 120^{\circ}\text{C}$ може сприяти рішенню проблеми необоротної сорбції СО на платинових каталізаторів. В зв'язку з цим значну увагу дослідники приділяють мембрамам з полібензотитазолу, допірованим фосфорною кислотою, які характеризуються низькою проникністю по метанолу і можуть працювати при температурах до $160 - 200^{\circ}\text{C}$. Тому ПЕ на їх основі набагато менш чутливі до додатків СО і надійно працюють при

низькій вологості. Однак важливою проблемою для таких мембран є вимивання фосфорної кислоти парами води. Можна відзначити роботи [266-269] по модифікації наночастинки неорганічних оксидів мембран на основі полібензотридазолу, яка може сприяти кращому утриманню фосфорної кислоти в татриці мембрани.

Ще одним типом матеріалів, які можуть працювати при підвищених температурах, є кислі солі лужних металів і амонія з тетраедричними аніонатами $M_nH_m (XO_4)_p$, провідність яких при температурах 150 – 200°C може наближатися до $10^{-1} \text{ См} \cdot \text{см}^{-1}$ [20]. Однак провідність низькотемпературної модифікації цих матеріалів, стабільною нижче температур фазового переходу, на кілька порядків менше. Для забезпечення можливості запуску ПЕ на їх основі при низьких температур можна використовувати копозиційні матеріали з добавкою нанорозмірних оксидів, стабілізуючих високотемпературну модифікацію.

Проблети роботи з воднем, що містять приміси CO, повністю вирішується для ТОПЕ, що працюють при істотно більш високих температурах, ніж раніше описані низькотемпературні ПЕ. У таких ТОПЕ зазвичай використовують киснепровідні мембрани, зокрема на основі оксиду цирконію, стабілізованого ітрієм, які характеризуються більше високою енергією активації провідності. Прийнятна провідність таких матеріалів зазвичай досягається лише при температурах $> 700^\circ\text{C}$. Однак для запуску ТОПЕ потрібно поступове нагрівання до цих температур від зовнішніх джерел в перебіг кількох годин, що поряд з високими масою і температурою істотно обмежує можливості їх роботи в мобільних системах і на транспорт. У зв'язку з цим робляться спроби знизити температуру роботи ТОПЕ і підвищити їх ефективність. Так, в публікаціях [5-9] описано використання тонкоплівкових матеріалів, що дозволяють зменшити гострі втрати в ТОПЕ.

Іншим вельми перспективним напрямом слід вважати розробку протонпровідних матеріалів, здатних працювати при суттєво більш низьких температурах, чим кисень. Найбільш відомі протонпровідячі матеріали є

складні оксиди на основі церату або цирконату барію. Для підвищення провідності їх часто допують тривалентні катіонати, що входять у позиції цирконію. У сухій атмосфері такі матеріали зазвичай володіють кисневою провідністю за рахунок переміщення іонів O_2 з вакансій. Однак у вологій атмосфері ці вакансії займають атоми кисню води, а іони водню, що вивільняються, забезпечують протонну провідність. Недолік таких матеріалів полягає в низькій стабільності по відношенню до вологи та CO_2 , що обумовлено присутністю в структурі лужнозелених металів. Тому важливим завданням слід вважати пошук матеріалів з малою концентрацією лужнозелених катіонів або зовсім не містять їх. Однак сучасні електроліти такого типу характеризуються порівняно низькою провідністю.

Для створення електродів ТОПЕ зазвичай використовують високопористі провідні матеріали: як катоди, як правило, виступають оксиди, а в якості анодів - пориста металлокерамика (наприклад, композити нікелю зі стабілізованим ітрієтритоксидом цирконію). Мета цих, як і в низькотемпературних ПЕ, процеси електроокислення водню і відновлення кисню протікають на трифазних межах.

Висновки по другому розділу

Розвиток водневий енергетики ставить перед дослідниками цілий ряд матеріалознавчих завдань, вирішення яких сприятиме становленню технологій даної галузі, включаючи отримання, очищення, зберігання водню та його перетворення в енергію. Для отримання водню існує ряд підходів, найбільш важливими з яких є електроліз води, що дозволяє отримувати чистий водень, і каталітична конверсія природного газу, спиртів і ін. У якості каталізаторів у процесах конверсії, як правило, виступають композиційні матеріали, які репрезентують собою частинки металів або сплавів, нанесені на оксидні носії. Однак співprodukтами цих процесів є оксиди вуглецю. Викиди CO_2 , ймовірно, будуть жорстко регламентовані, а монооксид вуглецю являє собою серйозну каталітичну отруту, що отруює каталізатори найбільш поширених низькотемпературних ПЕ.

РОЗДІЛ 3

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ АКУМУЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ І ВОДНЮ У ЕНЕРГОСИСТЕМАХ З ВІДНОВЛЮВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ

3.1 Вибір моделі розрахунку режимів роботи та економічних характеристик енергосистеми

Для розрахунків структури, режимів роботи та економічних характеристик енергосистеми використана математична модель REM-2 (Renewable Energy Model) із пакету MATLAB, що описує енергосистему довільної конфігурації, яка включає установки (технології) виробництва, транспорту і акумулювання енергії. Детальний опис моделі наведено у роботах [10, 11].

У моделі для аналізованої енергосистеми задаються списки первинних енергоресурсів, вторинних енергоносіїв і кінцевих видів енергії. До первинних енергоресурсів належить вся яка надходить в систему ззовні енергія (Наприклад, паливо для електростанцій). У кінцеву енергію включається енергія як споживана в даному пункті, так і що надходить на зовнішній ринок (наприклад, вироблені в енергосистемі синтетичне паливо або водень).

На відміну від моделей, заснованих на переборі варіантів структури енергосистеми з наступним імітаційним моделюванням її роботи [12 – 15], - оптимізаційна модель, представлена у роботі [10], не вимагає попереднього завдання режимів роботи елементів системи або алгоритм перемикання енергії між енергоджерелами, навантаженням та акумуляторами. Такий алгоритм може бути заданий лише в енергосистемі щодо простої конфігурації з акумулюванням енергії одного виду (акумулятор заряджається, коли енергія, яка виробляється ВДЕ, надлишкова, і розряджається, коли її недостатньо для електропостачання споживачів). Внаслідок цього модель REM-2 дозволяє досліджувати складні енергосистеми з одночасним виробництвом та акумулюванням енергоносіїв різних типів, в даному випадку це електрична

енергія та водень.

Шуканими змінними є встановлені та поточні потужності енергоджерел, запаси вторинної енергії в акумуляторах та їх ємності, а також потоки енергії, спрямовується на акумулювання. Цільова функція Z являє собою сумарні дисконтовані витрати на створення і експлуатацію системи за весь термін її служби. Для ефективних ринків ВДЕ вирішення задачі мінімізації витрат, як показано в роботі [16], близьке до вирішення задачі ринкової рівноваги.

Оптимізаційне завдання вирішувалося з використанням алгоритмів оптимізації GAMS (General Algebraic Modeling System).

Розглядалася екологічно чиста система електропостачання, що складається з вітроелектричних установок (ВЕУ), фотоелектричних перетворювачів (ФЕП) та системи виробництва, зберігання і енергетичного використання водню (Рис. 3.1).

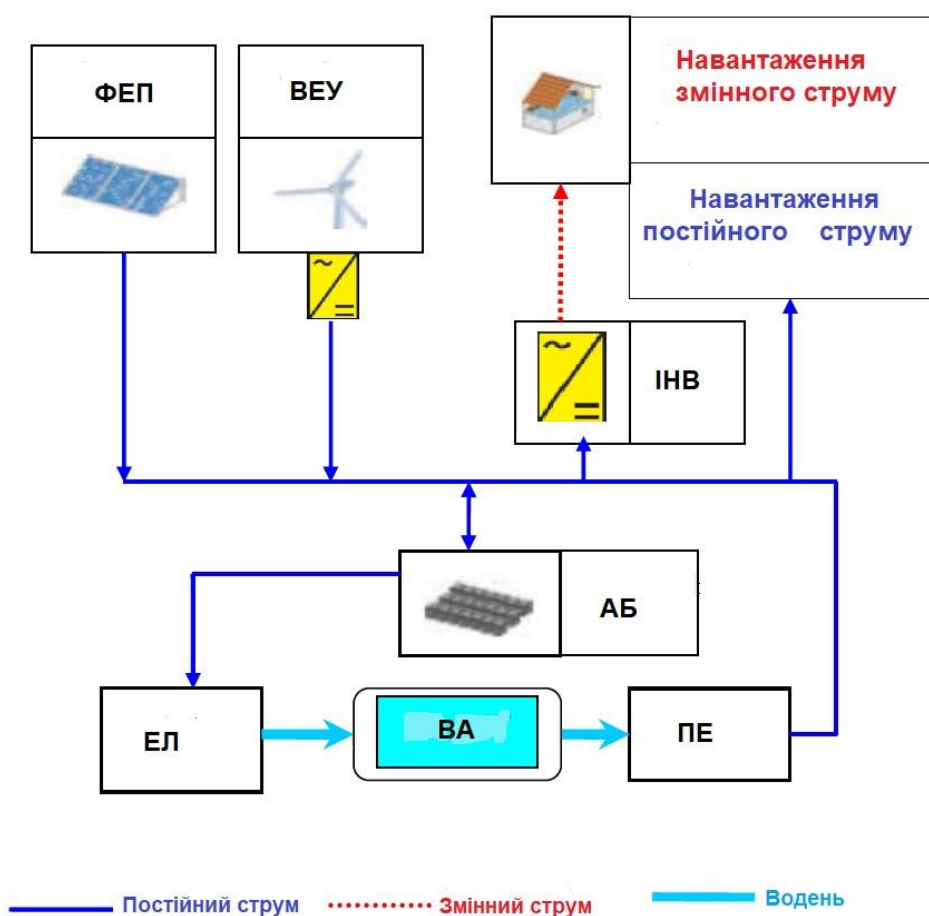


Рисунок 3.1. Схема потоків енергії у системі електропостачання з акумулюванням електроенергії та водню. Позначення: ФЕП – фотоелектричні

перетворювачі; ВЕУ - вітроелектрична встановлення; АБ - акумуляторні батареї; ЕЛ - електролізер; ВА – водневий акумулятор; ПЕ – паливні елементи; ІНВ – інвертор

В окремі моменти часу ВЕУ та ФЕП виробляють надмірну кількість електроенергії, яка перевищує потребу в ній (наприклад, в періоди сильного вітру або високої інтенсивності сонячного випромінювання). Надлишкова електроенергія надходить або в акумуляторні батареї, або використовується для виробництва водню методом електролізу. Водень зберігається в ресивері (ємності для зберігання водню), а потім, коли вироблення ВЕУ та ФЕП недостатнє для електропостачання споживачів, використовується паливними елементами, що виробляють електричну енергію.

Розглядалася автономна енергосистема з максимумом навантаження 1 МВт та кількістю годин її використання – 4600 год/рік. Кліматичні та метеорологічні умови приблизно відповідають умовам південної частини України та середньої частини течії Дніпра.

Сезонна зміна навантаження та кліматичних показників представлено у табл. 3.1. Випадковий характер надходження сонячної та вітрової енергії враховувався за допомогою формування залежності швидкості вітру і інтенсивності сонячного випромінювання від часу з кроком 1 год (з враховуючи наявність тривалих енергетичних затиш). При цьому середня годинна швидкість вітру знаходиться в інтервалі 0–25 м/с, значення годинної потужності сонячного випромінювання – в інтервалі 0-0,9 кВт/ м².

Таблиця 3.1 Сезонна зміна навантаження, швидкості вітру та приходу сонячної радіації

Параметр	Значення				
	Зима	Весна	Літо	Осінь	Усього за рік
Максимальне навантаження, %	100	80	70	90	100
Середня навантаження, % від річного максимуму	60	50	40	50	50

Середня багаторічна швидкість вітру (на висоті 10 м), м/с	7	4	3	6	5
Швидкість вітру, м/с	0–25	0–20	0–20	0–20	0–25
Сумарний прихід сонячної радіації, кВт·год/м ²	120	440	520	220	1300
Годинна потужність сонячної радіації, кВт/м ²	0-0,3	0-0,6	0-0,9	0-0,5	0-0,9

У даний час на світовому та вітчизняному ринках доступні сонячні панелі з питомою ціною 1000 дол./кВт та ККД понад 15% (наприклад, Astronergy CHSM6610P-260 Silver Poly Solar Panel) та сонячні контролери (імпортні – MidNite Classic LITE 150 MPPT Charge Con-troller та Four Star Solar а також вітчизняні - ECO Energia MPPT Pro).

Робоча характеристика ВЕУ [17, 18] (Залежність вихідний потужності від швидкості вітру): швидкість торкання $V_0=5$ м/с, номінальна швидкість $V_n=12$ м/с, максимальна швидкість вітру $V_m=25$ м/с, висота вежі - 25 м). У окремі моменти часу швидкість вітру перевищує номінальну швидкість ВЕУ (12) м/с на висоті осі вітроустановки) і спрацьовує обмеження по потужності (Вона досягає номінального значення). Якщо швидкість на висоті осі менше 12 м/с, але вище 5 м/с, то ВЕУ виробляє потужність пропорційну кубу швидкості вітру. Ця потужність менше номінальною потужності ВЕУ. В окремі години швидкість вітру менше швидкості торкання (5 м/с) і ВЕУ не виробляє електроенергію. При переході від висоти 10 м до висоти осі ВЕУ (вітроелектрична установки) (25) м) враховується розподіл вертикального профілю вітру по логарифмічному закону (швидкість вітру зростає зі збільшенням висоти) [17, 18].

Таблиця 3.2. Техніко-економічні показники, прийняті в розрахунках

Пристрій	Питомі капіталовкладення, дол./кВт	Затрати, % від капіталовкладень	ККД, %	Термін служби, рік
ВЕУ	2200	2,0	30	25
ФЕП	1500	1,5	15	25
АБ	150*	3,0	85	5
Воднева система – сучасні показники				
ЕЛ	2500–3500	5,0	75	10
ПЕ	3000–4000	2,5	45	10
ВА	25*	2,0	95	20
Воднева система – прогнозовані показники				
ЕЛ	1000–1500	2,2	80	10
ПЕ	1200–2000	2,5	50	20
ВА	15–20*	2,0	95	20

*Дол./кВт · год

У табл. 3.2 наведено сучасні показники аналізованої системи з урахуванням суттєвого зменшення за останні 1,5–2 роки цін на фотоелектричні перетворювачі (меншою мірою – на електролізери і паливні елементи) та їх можливої зміни в майбутньому, приблизно до 2025 р. (прогнозні показники) [6, 9, 19, 20].

3.2 Результати розрахунків для оцінки ефективності системи виробництва та акумулювання водню та їх аналіз

Для оцінки ефективності системи виробництва та акумулювання водню поряд з оптимізаційними розрахунками (без обмежень на окремі технології) проведено розрахунки із заборonoю на використання водню (далі – варіант «без водню»). Оптимальна система електропостачання включає ФЕМ, ВЕУ, а також акумулятори електроенергії та водню. Заборона на використання водню призводить до збільшення встановлених потужностей ВЕУ, ФЕМ, ємності акумулятора (табл. 3.3) та збільшення витрат. Це означає, що додавання до ВДЕ водневої системи забезпечує позитивний економічний ефект вже за сучасних техніко-економічних показників. При поліпшенні показників електролізерів та паливних елементів у перспективі цей ефект зросте. Значення цільової функції варіанту «з воднем» зменшується на 50% у порівнянні з варіантом «без водню».

Поряд з визначенням структури енергосистеми та витрат на її створення та експлуатацію становить інтерес аналіз динаміки виробництва, акумулюва-

ння та споживання енергії. Відповідні графіки для типових зимових та літніх діб наведено на рис. 3.2. Заряд АБ та потік енергії (водню) в ресивер показано в області від'ємних значень осі ординат.

У зимові дні (рис. 3.2, а) виробництво електроенергії від ФЕП незначне. У години, коли потужність ВЕУ перевищує потужність навантаження, відбувається заряд акумуляторних батарей і заповнення водневого акумулятора. У години, коли потужності ВДЕ недостатньо, здійснюється розряд АБ. В окремі години (у наведеному прикладі – з 14 до 16 год) безперебійність електропостачання забезпечується в основному за рахунок розряду батарей. У розглянутому випадку внаслідок короткотривалості перерв електропостачання від ВЕУ запасеної в акумуляторі електроенергії достатньо для забезпечення безперебійності електропостачання, і включення паливних елементів не потрібно.

Таблиця 3.2. Оптимальний склад системи електропостачання

Варіант системи	Усталені потужності, кВт					Ємності, кВт·ч	
	ВЕУ	ФЕП	ЕЛ	ПЕ	ІНВ	АБ	ВА
Сучасні показники							
Без водню	1800	1600	0	0	1010	34500	0
З воднем	1700	1250	330	800	1010	3960	104130
Перспективні показники							
Без водню	1800	1600	0	0	1010	34550	0
З воднем	1600	1300	580	840	1010	2220	109950

У літні дні (рис.3.2, b) перерви в роботі ВЕУ більш тривалі, в окремі години здійснюється виробництво електроенергії паливними елементами за рахунок накопиченого раніше водню. У передсвітанкові години одночасно розряджаються АБ та включаються паливні елементи. У передобідні години сумарної потужності ВЕУ та ФЕП виявляється достатньо для покриття графіка навантаження, в післяобідні години після припинення виробництва ВЕУ одночасно працюють ФЕП та ПЕ. У вечірні години підтримання балансу виробництва-споживання електроенергії забезпечують ВЕУ, при падінні швидкості вітру знову включаються паливні елементи. Внесок джерел енергії

в сумарний виробіток електроенергії наведено на рис. 3.3. З покращенням показників водневої системи збільшується оптимальна частка ПЕ.

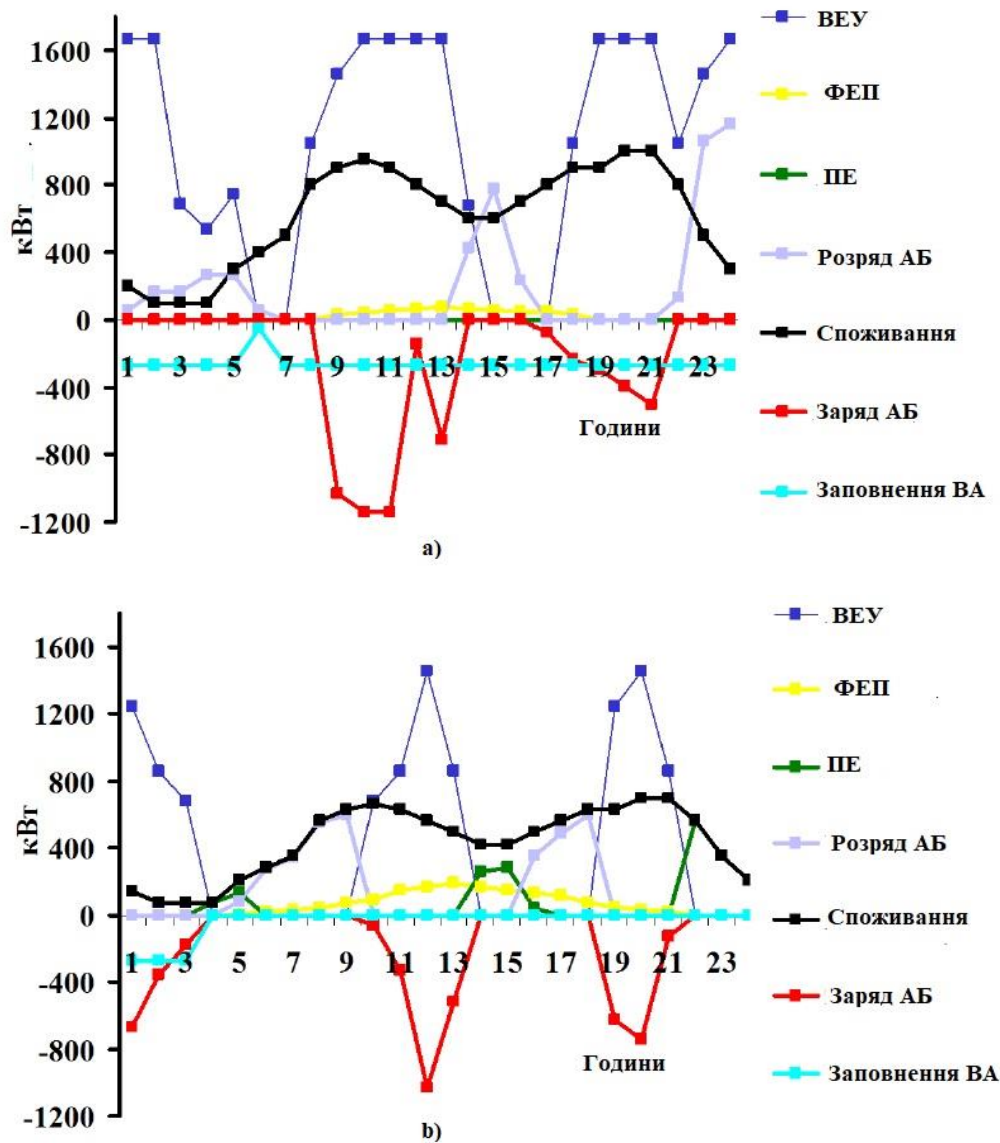


Рисунок 3.2. Графіки вироблення та акумулювання енергії: а – зимова доба; б – літня доба

Оптимальна ємність акумуляторних батарей (АБ) дозволяє забезпечувати безперебійне електропостачання при максимумі навантаження протягом ~4 год, оптимальна ємність ресивера дозволяє гарантувати електропостачання протягом понад 100 год при повному припиненні виробництва ВДЕ (наприклад, при одночасному встановленні чотиридобового енергетичного штилю при постійній високій хмарності або безперервному дощі, що

перешкоджають роботі ВЕУ та ФЕП).

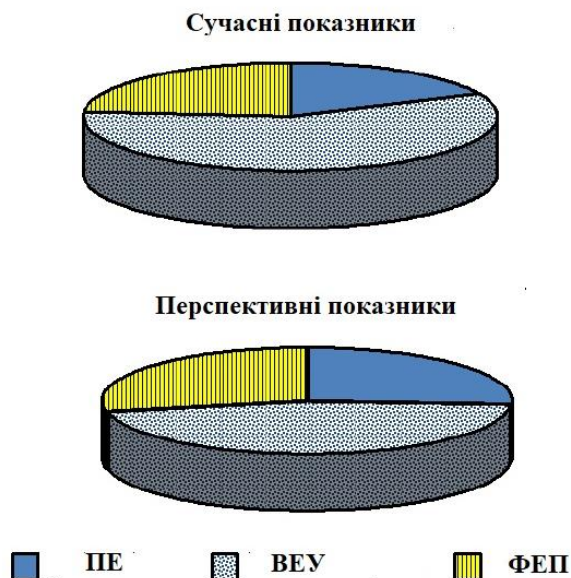


Рисунок 3.3. Внесок джерел енергії у виробництво електроенергії

Результати розрахунків суттєво залежать від тривалості та безперервності енергетичних затишшів. У разі їх відсутності найбільш економічним варіантом було б використання ВЕУ, ФЕП та акумуляторних батарей з ємністю, що дозволяє забезпечувати навантаження протягом декількох годин. Тоді виробництва та акумулювання водню не було б потрібно. Однак, для розглянутих метеорологічних умов характерні безперервні енергетичні затишшя тривалістю не менше 2–4 діб. При збільшенні безперервної тривалості енергетичних затишшів (простоїв ВЕУ та відсутності виробництва ФЕП) виникає необхідність виробництва та акумулювання водню, причому ємність ресивера зростає як зі збільшенням часу безперервних простоїв, так і з покращенням показників водневої системи (електролізерів, паливних елементів, ємностей для зберігання водню). Це узгоджується з отриманими раніше результатами (представлені в роботі [9]), згідно з якими акумулювання електричної енергії ефективно для короткострокових інтервалів часу (в даному випадку це видача максимальної електричної потужності протягом декількох годин), а для більш тривалих інтервалів часу (декілька діб) більш ефективним є акумулювання енергії у вигляді водню.

Висновок потретьому розділу

Проведено дослідження екологічно чистої системи електропостачання з відновлюваними джерелами енергії. Система включає фотоелектричні перетворювачі, вітроелектричні установки, акумулятори електроенергії та систему виробництва, зберігання та енергетичного використання водню.

ВИСНОВКИ

Розвиток водневої енергетики ставить перед дослідниками цілий ряд матеріалознавчих задач, вирішення яких сприятиме становленню технологій даної галузі, включаючи отримання, очищення, зберігання водню та його перетворення в енергію. На цьому шляху є значні науково-технічні досягнення, але ще залишилося багато проблем. Для отримання водню існує ряд підходів, найважливішими з яких є електроліз води, що дозволяє отримувати чистий водень, і каталітична конверсія природного газу, спиртів та ін. Як каталізatori в процесах конверсії, як правило, виступають композиційні матеріали, що являють собою частинки металів або сплавів, нанесені на оксидні носії. Однак супутніми продуктами цих процесів є оксиди вуглецю. Викиди CO_2 , ймовірно, будуть жорстко регламентовані, а монооксид вуглецю є серйозною каталітичною отрутою, що отруює каталізatori найпоширеніших низькотемпературних ТЕ.

Ключовою технологією використання водню будуть енергоустановки з ПЕ (паливними елементами). На відміну від традиційних машинних технологій, вони мають низку унікальних властивостей: високий ККД установок малої потужності, можливість підвищення ККД зі зменшенням температури процесу, збільшення ККД установки при її роботі на знижених навантаженнях. Основними проблемами, що постають при розробці ПЕ, є створення високоефективних каталізаторів електровідновлення кисню та забезпечення толерантності анода ПЕ до домішок CO .

Проведено дослідження екологічно чистої системи електропостачання з відновлюваними джерелами енергії. Система включає фотоелектричні перетворювачі, вітроелектричні установки, акумулятори електроенергії та систему виробництва, зберігання та енергетичного використання водню. Розрахунки за допомогою оптимізаційної математичної моделі показали ефективність спільного використання вітрової та сонячної енергії в розглянутих районах, а також одночасного акумулювання і електроенергії, і водню.

Акумулювання електричної енергії найбільш ефективно протягом

короткострокових інтервалів часу (видача електричної потужності протягом кількох годин). При збільшенні тривалості безперервних енергетичних затишшів до декількох діб більш економічним стає акумулювання водню. Економічний ефект, що забезпечується акумулюванням водню в розглядуваній системі електропостачання, виявився значним: він може досягати 50% при техніко-економічних показниках електролізерів, паливних елементів і водневих акумуляторів, прогнозованих на 10–15 років.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

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

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

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

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

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

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

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

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