УДК 621.311.4.031 **DOI 10.20535/1813-5420.2.2025.327485**

Б.В. Максименко[1], аспірант, ORCID 0009-0008-1510-6859
[1]Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ОГЛЯД СУЧАСНИХ ВОДНЕВИХ ТЕХНОЛОГІЙ В ЕНЕРГЕТИЦІ ТА ТРАНСПОРТІ

У статті розглядаються сучасні можливості водню як перспективного джерела енергії, що може стати основою переходу до екологічно чистої енергетики. Аналізується чинна законодавча база, яка регулює діяльність у сфері водневої промисловості, та її вплив на розвиток технологій. Окрему увагу приділено способам отримання зеленого водню, особливо за допомогою електролізу води, що базується на використанні відновлюваних джерел енергії, таких як сонячні та вітрові електростанції.

Розглядаються фізичні й хімічні методи зберігання водню: у газоподібному, рідкому станах, а також у вигляді хімічних сполук. Висвітлюються складнощі транспортування водню та можливі технологічні підходи до їх вирішення. У статті також описуються напрямки практичного використання водню в різних секторах економіки, зокрема в енергетиці, промисловості й транспорті, де він може стати альтернативою традиційним вуглеводневим паливам.

Обговорюються можливості впровадження водневих технологій в Україні, враховуючи її природно-ресурсний потенціал, наявну інфраструктуру та економічні реалії. Визначено перспективи розвитку водневої промисловості, її роль у забезпеченні енергетичної незалежності країни та інтеграції України у світові ринки водню.

Проведений аналіз може слугувати основою для вибору шляху майбутніх досліджень.

Ключові слова: *водень, енергоефективність, електроліз, енергетика, альтернативне паливо, оцінка ефективності.*

Вступ

Досягнення цілей вуглецевої нейтральності – комплексний процес, що включає різні фактори. Однією складовою цього процесу є використання водню як альтернативи для традиційного палива. Це дозволить покрити ті галузі промисловості де впровадження використання енергії з відновлюваних джерел є важким чи не рентабельним. Галузями перспективними для використання водню є, наприклад, морські перевезення, авіація, транспорт. Водень як альтернатива викопним паливам був обраний не випадково, оскільки він є найпоширенішим елементом всесвіту і має велику енергоємність. Починаючи з 2020 року Європейський союз, а пізніше США та Китай, й інші провідні країни світу затвердили свої водневі стратегії. Це дає великий поштовх в дослідженнях розвитку водневих технологій.

Мета

Метою даної статті є огляд сучасного стану галузі водневої енергетики в світі. Опис і порівняння технологій виробництва, зберігання, транспортування водню. Розгляд водневої енергетики і її перспектив в Україні.

Аналіз матеріалів

Водневі стратегії

Відповідно до європейської стратегії розвитку водневої енергетики водень визнано перспективним паливом для заміни традиційного викопного палива. Стратегія передбачає всеосяжну структуру для підтримки використання відновлюваного водню з низьким вмістом вуглецю, щоб допомогти декарбонізувати ЄС економічно ефективним способом і зменшити його залежність від імпорту викопного палива. Стратегія ЄС була прийнята в 2020 році і на початок 2022 вже виконано 20 ключових етапів [1].

Воднева стратегія США прийнята 2023 року і передбачає ряд дій, що будуть виконуватись до 2050 року. Стратегія досліджує можливості використання чистого водню для досягнення національних цілей декарбонізації в багатьох секторах економіки. Основна ціль стратегії це зменшення викидів вуглекислого газу в атмосферу на 10% до 2050. Для цього розроблений конкретний план дій і визначаються потреби у співпраці між федеральними урядовими установами, промисловістю, академічними колами, національними лабораторіями, державними, місцевими та племінними громадами, екологічними та справедливими спільнотами, профспілками та численними групами зацікавлених сторін для прискорення прогресу та виходу на ринок [2].

Китай не має певної офіційної водневої стратегії але є найбільшим виробником водню в усьому світі, у 2020 році було вироблено близько 33 млн.т., в основному з вугілля та природного газу, але останнім часом спостерігалося значне зростання виробництва водню за допомогою електролізу води. До 2022 року 30% світових потужностей електролізера було встановлено в Китаї. З початку 2023 року Китай досяг значного прогресу у виробництві водню за допомогою електролізу води, і до кінця року очікується, що

встановлена потужність електролізера досягне 1,1 ГВт, що становитиме 50% світової частки. Далі очікувана встановлена потужність електролізера в Китаї має потроїтися до 3,3 Вт до 2024 року та досягти майже 5,4 ГВт до 2025 року [3].

Загалом водневу стратегію прийняли уряди 41 держави, на які припадає близько 80% від викидів CO_2 пов'язаних з енергетикою. Також уряди різних країн оновлюють свої програми стратегій, для збільшення цілей. Для порівняння, сумарні цілі станом на 2022 рік по отриманню водню з низьким рівнем викидів становили 15-22 млн. т. і це число збільшилось до 27-35 млн. т. в 2023 році [3].

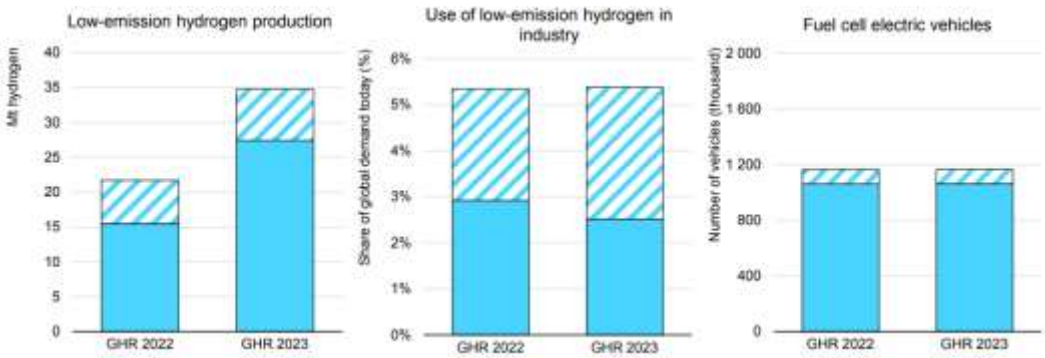

Рисунок 1 – порівняння показників програм розвитку промисловості 22-23 років (GHR = Глобальний огляд водню)

Для країн, які не мають цільового обсягу виробництва, виробництво водню з низьким рівнем викидів розраховується на основі цільових показників потужності, припускаючи коефіцієнт потужності 57% і енергоефективність (LHV) 69% для електролізерів і 90% для технологій на основі викопного палива. Пунктирна область представляє діапазони цілей політики.)

Воднева стратегія України передбачає досягнення виробництва низьковуглецевого водню в обсягах до 1,3 млн тонн у 2035 році та до 3,0 млн тонн у 2050 році, залежно від обсягів експорту та внутрішнього попиту. І споживання в обсягах від 0,1 до 0,5 млн тонн у 2035 році та до 1,5 млн тонн у 2050 році залежно від обсягів попиту на внутрішньому ринку [4]. Стратегія України передбачає значний експорт водню за рахунок вже наявної інфраструктури газопроводів, та вигідне географічне положення. Також Україна має великий потенціал в сфері енергетики. На кінець 2023 року потужність відновлюваної енергетики становила близько 10.9 ГВт. Також потенційна потужність АЕС становить 14 ГВт. Але станом на 2024 рік вона знижена через повномасштабне вторгнення росії і становить близько 7 ГВт. Також через бойові дії і втрату каховської ГЕС складно оцінити потужність ГЕС, але до початку війни вона становила 6,23 ГВт за даними на 2019 рік [5].

Українська Регіональна Газова Компанія(РГК) почала роботу з власним водневим проектом в 2020 році з створення полігонів для випробувань. На тестових майданчиках відтворені реальні моделі газорозподільних мереж областей [6].

Загалом в Європейському просторі 18 проектів зареєстрованих в пов'язані з Україною (рис 2) [7].

Project	Company	Archetype	Location	Size	Maturity
Landfill Organic Waste-to-Hydrogen Plant	Renewable Resources Consulting & Inno	A.A Hydrogen production	UA - Ukraine		
H2 Influence on Gas Distribution Network	Regional Gas Company	B.A T&D: Pipelines	UA - Ukraine		2020
H2 Influence on Gas Distribution Network	Regional Gas Company	B.D T&D: Inland distribution	UA - Ukraine		2020
H2 Influence on Gas Distribution Network	Regional Gas Company	E.A Gas usage within a 100 % hydrogen distribution	UA - Ukraine		2020
H2 Influence on Gas Distribution Network	Regional Gas Company	E.B Usage of gas blends from grid, with hydrogen and	UA - Ukraine		2020
H2 Influence on Gas Distribution Network	Regional Gas Company	E.D Decentralised heat and power generation using H	UA - Ukraine		2020
Hydrogen Wind Solar Park a capacity	East European Association for the Devel	A.A Hydrogen production	UA - Ukraine		
Hydrogen production from waste SKH	SKH Technology	A.A Hydrogen production	UA - Ukraine		
H2EU+Store	RAG Austria AG	A.A Hydrogen production	SK - Slovensko; AT - Österreich; DE - Deutschland; Ukr		2025
H2EU+Store	RAG Austria AG	B.A T&D: Pipelines	SK - Slovensko; AT - Österreich; DE - Deutschland; Ukr		2025
H2EU+Store	RAG Austria AG	F.D Integrated infra and storage	SK - Slovensko; AT - Österreich; DE - Deutschland; Ukr		2025
ON H2 import becomes Central European H	NETAGAS	B.A T&D: Pipelines	SK - Slovensko; CZ - Česko; DE - Deutschland; Ukraine		
Central European Hydrogen Corridor (CEHC)	Open Grid Europe GmbH	B.A T&D: Pipelines	DE - Deutschland; CZ - Česko; SK - Slovensko; Ukrain		
UA-H2NG Transmission System "Dnipro–EU	East European Association for the Devel	B.A T&D: Pipelines	Ukraine		
KyivH2BUS	Ukrainian Energy Storage Association &	D.A Land road vehicle fleet deployment	Ukraine		
SUMY H2 CAPACITY	Sumy Machine-Building Science and Pro	A.B Electrolyser manufacturing	UA - Ukraine		2021
Border-close H2 plant in Western Ukraine	Sumy Machine-Building Science and Pro	A.A Hydrogen production	UA - Ukraine	200 MW	2023
UA Ponyatinka Yellow Ducks	Sumy Machine-Building Science and Pro	A.A Hydrogen production	UA - Ukraine	200 MW	2023

Рисунок 2 – *проекти пов'язані водневою стратегією ЄС, в яких приймає участь Україна.*

Технології виробництва водню.

Стратегія ЄС передбачає використання «чистого» зеленого водню, тобто водню отриманого з відновлюваних джерел енергії. В той же час стратегії деяких провідних країн як США та Китай орієнтуються на виробництво водню з низьким рівнем викидів. Ці різні підходи мають спільну рису оскільки вони передбачають збільшення використання і розвитку електролізерів для отримання водню без викидів. А водень з низьким рівнем викидів базується на вже наявній інфраструктурі і технологіях

риформінгу з використанням технологій вловлювання зберігання й утилізації вуглецю(CCUS). Для України як майбутнього члена ЄС варіант розвитку генерації водню, це розгляд варіантів генерації водню з нульовим рівнем викидів CO2 найбільш перспективним з яких є електроліз.

В роботі [8] проведено порівняння різних підходів до отримання водню за допомогою енергії сонця: фотокаталітичне розчеплення води(PC), фотоелектрохімічне розчеплення води(PEC), фотоелектричне електрохімічне розчеплення води(PV-EC), сонячне термохімічне розчеплення води(STC), фототермічне каталітичне утворення H2(PTC), фотобіологічний метод(PB) результати порівняння наведено в таблиці 1.

Основна перевага використання електролізерів в порівнянні з аналогами є у відносній ефективності, і довговічності, що дозволяє комерціалізувати технологію. В той час як інші технології мало дослідженні, хоча в перспективі можуть давати кращі показники. Оскільки при розрахунку використання електролізера потрібно враховувати як його продуктивність так і продуктивність сонячних панелей, за допомогою яких він працює.

Таблиця 1. – переваги і виклики різних підходів до отримання водню використовуючи енергію сонця.

Підходи для сонячної генерації H_2	**Переваги**	**Виклики**
PC розщеплення води	найбільш ідеальний метод для сонячного H_2 виробництва	низька ефективність перетворення світла
	низька складність	незадовільна стійкість
	чистий і стійкий	вимога до газу (H_2 і O_2) відокремлення
PEC розщеплення води	високоефективний	висока вартість
	низький вплив на навколишнє середовище	висока складність
		незадовільна стійкість
PV-EC розщеплення води	зріла технологія та комерційно життєздатна	висока вартість
	легко масштабується	висока складність
	високоефективний	відносно високий вплив на навколишнє середовище для виробництва фотоелементів
	тривалий термін служби	
STC цикл поділу води	високоефективний	вимога до ефективного сонячного колектора
	відносно низька вартість	вимога до кислото- і термостійких матеріалів
	надійний і життєздатний	ефективна та надійна конструкція реактора
PTC H_2 виробництво з риформінгу метану	здійсненна технологія (на основі основних на даний момент H_2 виробничий процес від SRM)	високі витрати на експлуатацію та обслуговування
	висока ефективність перетворення (>80%)	високі CO_2 викиди
	H_2 отриманий з високою чистотою (>99,95%)	
	пом'якшення дезактивації каталізатора світлом	
PB H_2 виробництво	використовує низьку інтенсивність світла та широкий спектр світла	низька ефективність перетворення світла
	використовує воду або велику кількість органічних субстратів, отриманих із відходів	вимога до анаеробних фотобіореакторів
	чистий і стійкий	великі витрати

Зберігання і транспортування

Транспортування водню є однією з ключових проблем його широкомасштабного використання через фізичні властивості цієї речовини. У чистому вигляді водень має низьку густину, що ускладнює його перевезення стандартними методами. Найпоширенішими підходами є транспортування водню у стиснутому стані за високого тиску або у зрідженому вигляді при наднизьких температурах. Однак обидва

ці способи вимагають значних енергетичних витрат і створення спеціальної інфраструктури, що є дороговартісним і технічно складним процесом [9].

Одним із перспективних напрямів розвитку є транспортування водню у складі хімічних носіїв, таких як метан (CH_4) або аміак (NH_3). Цей підхід дозволяє використовувати існуючі мережі трубопроводів і транспортну інфраструктуру, розроблені для інших газів. Аміак, наприклад, має перевагу вищої щільності водню порівняно з його рідким станом, а також менш вимогливий до умов зберігання. Завдяки цьому аміак дедалі частіше розглядається як ефективний засіб транспортування водню на далекі відстані. У пункті призначення аміак можна розкласти на водень і азот за допомогою спеціальних каталітичних реакторів [10].

Окрім хімічних носіїв, активно досліджуються нові технології, такі як адсорбція водню у твердих матеріалах, зокрема металогідридах, та використання рідких органічних водневих носіїв (LOHCs). Ці методи мають потенціал стати більш енергоефективними й безпечними альтернативами. Наприклад, LOHC-технології дозволяють транспортувати водень у вигляді рідин, які залишаються стабільними за кімнатної температури, що спрощує логістичні операції [11].

Поряд із технічними аспектами значна увага приділяється інтеграції транспортування водню у вже існуючі енергетичні системи. Це включає розробку стандартів для нових видів інфраструктури, міжнародне співробітництво та стимулювання інвестицій у новітні технології. Ефективне транспортування водню є важливим кроком для розширення його використання в енергетиці, промисловості та транспорті, а також для досягнення глобальних кліматичних цілей [12].

Штучний метан

Компанія Tokyo Gas [13] працює з технологією е-метану. Технологія створення метану з водню отриманого з відновлюваних джерел і CO_2 дозволяє отримати паливо, що не мітитиме вуглецевого сліду за рахунок створення з вуглекислого газу. Ця технологія дозволяє розширювати застосування водню як енергоносія, а також зменшити втрати під час транспортування. Запропонована система працює як один комбінований пристрій що виконує функцію електролізера для отримання водню і синтезу метану за допомогою реакції Сабатьє — Сандерана. При цьому тепло що утворюється при синтезі використовується для покращення електролізу.

Оскільки штучний метан має всі ті ж характеристики що й природний газ то вже наявна газова інфраструктура є придатною для його зберігання і використання. Це робить дану технологію важливою на шляху переходу до вуглецевої нейтральності.

Використання рідких органічних носіїв(LOHC)

Використання LOHC для збергінання і транспортування водню, є альтернативою перетворення його на аміак/метан.

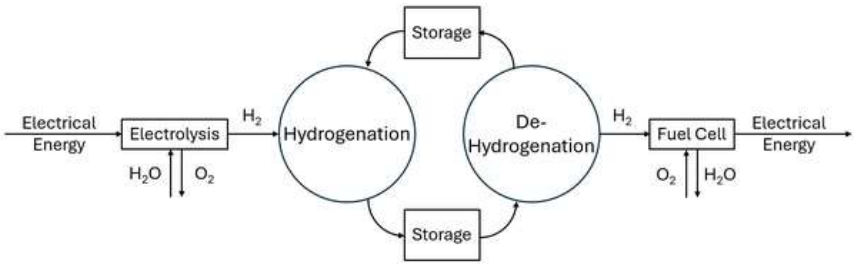

Рисунок 3 – *схема LOHC для використання водню.*

Принцип LOHC досить простий це насичення хімічних елементів(наприклад толуен) воднем до отримання насиченої сполуки(метилциклогексан) яка транспортується, і відновлюється після транспортування віддаючи водень.

Використання рідких органічних носіїв дозволяє транспортувати гідроген за допомогою морського транспорту. Цей метод вже застосовувався в Японії для перевезення водню за допомогою танкерів з Брунею[14].

Використання

Отриманий чистий водень можна використовувати багатьма різними методами, основні:

1.Спалювання чистого водню.

2.Спалювання суміші водень/природний газ.

3.Утворення і використання е-метану, чи інших хімічних сполук.

4.Використання паливних елементів.

За своєю природою спалювання є найпростішим для отримання тепла і енергії. Робота [15] наводить аналіз ефективності паливних мікрогазових турбін в залежності від палива що використовується(чистий водень, суміш, природний газ). У дослідженні були використані п'ять моделей мікрогазотурбін (3, 30, 65, 100 і 200 кВт) для оцінки техніко-економічних показників при використанні палива у вигляді суміші з 100% водню, 30% водню і 70% природного газу, а також 100% природного газу. Технічні результати

підтверджуються експериментальними даними першої в світі мікрогазотурбіни, що працює на 100% водню, розташованої в Ставангері, Норвегія.

Порівнюються економічні сценарії на 2024, 2030 та 2040 роки, звертаючи увагу на вплив змін цін на паливо та регуляторних змін на техніко-економічні показники мікрогазотурбін. Класифікація мікрогазотурбін здійснюється за допомогою методу «Техніка переваги замовлення за подібністю до ідеального рішення — багатокритеріального прийняття рішень» (TOPSIS-MCDM), базуючись на їх техніко-економічних показниках. Ранжування мікрогазотурбін за результатами техніко-економічного аналізу є важливим внеском даного дослідження. Здійснено аналіз чутливості п'яти мікрогазотурбін при зміні ціни на водневе паливо.

Робота [16] відображає комплексну основу для прийняття обґрунтованих інвестиційних рішень зацікавленими сторонами, сприяючи плавному переходу до 100% виробництва електроенергії на базі водню. Отримані дані підтримують використання сумішей водню та природного газу як проміжного рішення для досягнення водневої економіки.

Використання паливних елементів

Паливні комірки є пристроями, які безпосередньо перетворюють хімічну енергію палива (зазвичай водню) в електричну. Ця технологія використовується для забезпечення енергією транспорту, будівель, портативних пристроїв і навіть інфраструктури. Основною перевагою є відсутність викидів вуглекислого газу, адже продуктами реакції є електрика, вода та тепло.

Основою ПК є електрохімічна реакція між воднем і киснем. Водень, проходячи через анод, розщеплюється на протони й електрони. Електрони створюють електричний струм, проходячи через зовнішній ланцюг, тоді як протони рухаються через мембрану до катода, де з'єднуються з киснем, утворюючи воду.

Енергетика. Паливні комірки пропонують можливість накопичення та використання енергії з відновлюваних джерел (ВДЕ), таких як сонячна чи вітрова енергетика. Це забезпечує стабільність системи при нестабільному виробництві енергії з ВДЕ.

Транспорт. Автомобілі на водневих паливних комірках є альтернативою електромобілям, особливо в сегментах вантажівок і громадського транспорту. Аналіз різних видів транспорту свідчить про те, що водневі паливні комірки є економічно та екологічно вигіднішими для важкого транспорту, зокрема вантажівок і автобусів, у порівнянні з акумуляторами, через вищу енергетичну щільність водню. Згідно з даними IEA[17], водневі паливні комірки забезпечують більшу автономність і швидкість заправки в порівнянні з електромобілями. Використання в транспорті:

Залізниця: Канадські та американські оператори почали активно застосовувати водневі локомотиви (Alstom Coradia iLint [18]). Це дозволяє скоротити витрати на електрифікацію залізничних ліній та повністю виключити шкідливі викиди.

Автомобілі: Моделі, такі як Toyota Mirai, демонструють ефективність паливних комірок, особливо у порівнянні з акумуляторними електромобілями на тривалих дистанціях[19].

Авіація: Прототипи літаків на водневих паливних комірках стають популярними через їхню можливість нульових викидів CO_2, але виклики залишаються через об'ємність систем зберігання водню[20].

Судна: Судноплавство активно тестує твердотільні паливні комірки для підвищення енергетичної ефективності та скорочення забруднення океанів[21].

Промисловість. Використання водню в промисловості тісно пов’язане з вже наявною інфраструктурою. Сьогодні більшість водню використовується для створення добрив, і ця галузь використання не буде зменшуватись з часом, оскільки це впливає на якість життя, і доступність їжі. Але частка зеленого водню в галузі створення добрив буде збільшуватись. Ще одним персективним варіантм використанням водню, крім вже наведених, є важка промисловість. Водень може замінити собою традиційне паливо що використовується в металургійній промисловості. Також зелений водень використовується для відновлення метану з уловленого вуглекислого газу після його спалювання. Такі варіанти використання дозволяють зменшувати викиди CO_2 вже сьогодні, і мають перспективи для розвитку в майбутньому.

Впровадження в Україні

Як було описано раніше Україна має власний проект водневої стратегії. Остання редакція проекту, згідно з даними з сайту міністерства енергетики 17.05.2024[22].

Україна має значний потенціал ВДЕ, і велику ядерну генерацію. Це дозволяє отримувати зелений водень, чи дешевий жовтий водень. Тому перспективним є створення великих електролізних систем біля АЕС, для створення можливості акумулювання енергії, і балансування системи. Та розподіленої системи невеликих електролізерів біля ВДЕ.

Розвинена газотранспортна система дозволяє зменшити початкові капіталовкладення в проекти транспортування водню[23]. І полегшити створення мережі водневих трубопроводів. Також за умови використання сполук з воднем, таких як метан чи аміак, отриманих шляхом синтезу з чистого водню, є

можливість використовувати вже наявні системи без модернізації[24]. Ці рішення дозволять значно скоротити викиди вуглекислих газів, за рахунок зменшення споживання природного газу.

За своєю природою певні типи електролізерів можуть працювати як на генерацію водню так і на генерацію струму, при цьому робота в обох випадках майже не вимагає часу на перемикання режимів роботи. Що дозволяє використовувати системи електролізерів для стабілізації напруги в мережі. Але даний метод потребує додаткових досліджень[25].

Розвиток і впровадження водневого транспорту, який поступово відбувається в країнах Європи і світу потребуватиме розвитку інфраструктури заправних станції. Щодо цього є кілька можливих рішень

1.Це може бути виконано за рахунок розвитку і впровадження нових систем ВДЕ разом із системами акумулювання і заправною станцією. Що дозволить отримати додатковий розвиток систем ВДЕ, та більш стабільну розподілену систему генерації. Яка разом з тим зможе використовуватись для балансування на районному рівні.

2.Розвиток газотранспортної системи і створення системи заправних станцій на їх основі. Це дозволить залучити додаткові інвестиції до системи газорозподілу та ядерної генерації. Оскільки це дозволяє використовувати більше енергоносіїв отриманих з великих систем електролізу з дешевої ядерної енергії.

Застосування водню чи синтезованих похідних речовин в промисловості потребує великих обсягів генерації. Що теж може бути вирішеним за рахунок великих електролізерів та використання енергії з АЕС.

В сучасних реаліях війни з росією і постійних атак на енергетичну інфраструктуру, використання водню могло б допомогти стабілізувати систему і створити додатковий захист. Оскільки розвиток водневої інфраструктури, і поєднання її з енергетичною, дозволяє покращити як розподіл генерації, так і транспортування енергії. Шляхом створення альтернативних маршрутів і використання не пов’язаних систем.

Розвиток водневої інфраструктури в Україні, також має й певні обмеження, і слабкі сторони це:

- Низький КПД в перерахунку перетворення енергія – водень – енергія. Що є важливим при акумулюванні, та поки що це менше за ГАЕС 40% проти 60-70% КПД.
- Необхідність великих капіталовкладень в розвиток і будівництво електролізерів. Оскільки Україна на даний момент не має власних потужностей для створення великих систем електролізу води для отримання водню, більшість інфраструктури доведеться закуповувати, як і наймати спеціалістів для її впровадження і навчання, і підтримки.
- Ризики пов’язані з війною що триває.

На основі цих обмежень можна визначити можливості, які слід використати, і на чому зосередитись.

1.Створення науково виробничої бази для створення власних електролізних комплексів. Це дозволить залучати більше капіталу в промисловість і розвинути експорт. Наявні в Україні надра корисних копалин дозволяють організувати створення електролізерів. А наукова база за умови концентрації ресурсів, дозволяє в термін 3-5 років створити потрібні системи чи їх прототипи.

2.В умовах війни триває постійний потік інвестицій і стрімкий розвиток технологій. Залучення певної кількості ресурсу для розвитку водневої промисловості може забезпечити додатковий рівень стабільності і захисту для енергетичного сектору. Та сприяти підтримці економіки, за рахунок високого попиту на водневі технології у світі.

Висновки

Виробництво, зберігання і транспортування водню перебувають в стадії швидкого розвитку і забезпечуються достатніми інвестиціями. При цьому також отримують розвиток і суміжні галузі. Водень передбачає широке застосування у енергетичному плануванні, оскільки дозволяє отримувати і перетворювати енергію без викидів вуглекислого газу.

Виробництво водню в короткостроковій перспективі покладається на розвиток і масштабування електролізерів, хоча в майбутньому можливі використання інших конкурентних технологій.

Зберігання і використання водню можливе як і в чистому вигляді, так і як хімічну сполуку – метан, амоніак, чи інші. Використання сполук з гідрогеном дозволяє розширити шляхи його застосування, та зменшує вартість інфраструктури, оскільки дозволяє використовувати вже наявні газопроводи. Використання зріджених органічних носіїв дозволяє забезпечити транспортування морським транспортом.

Але разом з перевагами використання водню має певні виклики:

- Потреба впровадження і запуску нової інфраструктури.
- Втрати енергії при кожному перетворенні.
- Складність зберігання/транспортування.
- Вартість.

Вирішення описаних проблем є важливим для розвитку водневої промисловості.

Україна є перспективною для впровадження і розвитку водневих технологій і інфраструктури. Оскільки в Україні вже наявна розвинена газотранспортна інфраструктура це дозволяє зменшити витрати

на початковому етапі впровадження. Реалізація проектів розвитку, що базуватиметься на створенні технічних можливостей для будівництва електролізних систем разом з мережами розподілення дозволить залучати інвестиції з Європейських і світових фондів. Та розвивати Україну як провідну країну у сфері водневої промисловості. Пізніше впровадження в сектор енергетики дозволить забезпечити додатковий рівень захисту і стабільності для мережі. Можливість використання атомної генерації і доступ до дешевої енергії дозволяють забезпечити конкурентні можливості у випадку експорту, і меншу ціну отримання чистого водню.

Список використаної літератури

1. European Commission. Воднева стратегія ЄС. Ключові дії водневої стратегії ЄС. URL: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-systems-integration/hydrogen/key-actions-eu-hydrogen-strategy_en (дата звернення: 15.12.2024).

2. U.S. Department of Energy. Воднева стратегія США: Національна стратегія і дорожня карта чистого водню США. URL: https://www.hydrogen.energy.gov/docs/hydrogenprogramlibraries/pdfs/us-national-clean-hydrogen-strategy-roadmap.pdf?sfvrsn=c425b44f_5 (дата звернення: 15.12.2024).

3. International Energy Agency (IEA). Global Hydrogen Review 2023. URL: https://iea.blob.core.windows.net/assets/ecdfc3bb-d212-4a4c-9ff7-6ce5b1e19cef/GlobalHydrogenReview2023.pdf (дата звернення: 15.12.2024).

4. Міністерство енергетики України. Воднева стратегія України. URL: https://www.mev.gov.ua/sites/default/files/field/file/vodneva-strategiya17.05.2024.pdf (дата звернення: 15.12.2024).

5. Українські Гідроенергія. Гідроенергетика: діяльність. URL: https://uhe.gov.ua/diyalnist/hidroenerhetyka (дата звернення: 15.12.2024).

6. Регіональна Газова Компанія. Чиста енергія. URL: https://rgc.ua/ua/cleanenergy (дата звернення: 15.12.2024).

7. European Commission. Єдиний ринок та економіка. URL: https://single-market-economy.ec.europa.eu/index_en (дата звернення: 15.12.2024).

8. American Chemical Society. Hydrogen Energy Letters. URL: https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsenergylett.1c02591?fig=fig1&ref=pdf (дата звернення: 15.12.2024).

9. Dawood, F., Anda, M., & Shafiullah, G. M. Hydrogen production for energy: An overview. International Journal of Hydrogen Energy, 45(7), 3847-3869 (2020).

10. International Energy Agency (IEA). The Future of Hydrogen: Seizing today's opportunities. URL: https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen (дата звернення: 15.12.2024).

11. Bañares-Alcántara, R., et al. Ammonia as a hydrogen carrier for transportation and storage. Journal of Cleaner Production, 282, 124500 (2021).

12. Hydrogen Europe. The role of hydrogen in achieving carbon neutrality. URL: https://hydrogeneurope.eu (дата звернення: 15.12.2024).

13. Mitsubishi Corporation. Mitsubishi Corporation to Participate in Large-Scale Offshore Wind Power Generation Project in Taiwan. URL: https://www.mitsubishicorp.com/jp/en/news/release/2022/0000050341.html (дата звернення: 15.12.2024).

14. Chiyoda Corporation. Hydrogen Energy. URL: https://www.chiyodacorp.com/media/20220208_E_R1.pdf (дата звернення: 15.12.2024).

15. Techno economic analysis and performance based ranking of 3–200 kW fuel flexible micro gas turbines running on 100% hydrogen, hydrogen fuel blends, and natural gas. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652624032682 (дата звернення: 15.12.2024).

16. Absolute Hydrogen. Hydrogen-powered transports. URL: https://absolut-hydrogen.com/en/hydrogen-powered-transports/ (дата звернення: 15.12.2024).

17. International Energy Agency (IEA). Global Hydrogen Review 2024: Hydrogen demand. URL: http://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024/hydrogen-demand (дата звернення: 15.12.2024).

18. Alstom. Alstom Coradia iLint: The world's first hydrogen-powered train. URL: https://www.alstom.com/solutions/rolling-stock/coradia-ilint (дата звернення: 15.12.2024).

19. Toyota. Toyota Mirai: The future of hydrogen fuel cell vehicles. URL: https://www.toyota.com/mirai/ (дата звернення: 15.12.2024).

20. Airbus. Hydrogen-powered aviation: The future of zero-emission flight. URL: https://www.airbus.com/innovation/zero-emission/hydrogen.html (дата звернення: 15.12.2024).

21. DNV GL. Hydrogen in shipping: The potential of hydrogen fuel cells for maritime applications. URL: https://www.dnv.com/maritime/hydrogen-in-shipping.html (дата звернення: 15.12.2024).

22. Міністерство енергетики України. Воднева стратегія. URL: https://www.mev.gov.ua/sites/default/files/field/file/vodneva-strategiya17.05.2024.pdf (дата звернення: 15.12.2024).

23. Оператор ГТС України. ГТС України. URL: https://tsoua.com/ (дата звернення: 15.12.2024).

24. Оператор ГТС України. Консультаційний документ з водневої стратегії. URL: https://tsoua.com/wp-content/uploads/2021/10/Hydrogen-Consultation-paper-v2.pdf (дата звернення: 15.12.2024).

25. Cozzolino, R., Bella, G., & Alam, T. Electrolyzers for Energy System Stabilization: A Review. Frontiers in Energy Research. URL: https://www.frontiersin.org/journals/energy-research/articles/10.3389/fenrg.2024.1358333/full (дата звернення: 15.12.2024).

B. Maximenko[1], Ph. D. student, ORCID 0009-0008-1510-6859
[1]National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

OVERVIEW OF MODERN HYDROGEN TECHNOLOGIES IN ENERGY AND TRANSPORT

The article discusses the modern potential of hydrogen as a promising energy source, which could become the basis for the transition to environmentally clean energy. It analyzes the current legislative framework regulating hydrogen industry activities and its impact on technology development. Special attention is given to methods of producing green hydrogen, particularly through water electrolysis based on the use of renewable energy sources such as solar and wind power plants.

The article examines the physical and chemical methods of hydrogen storage: in gaseous, liquid states, as well as in the form of chemical compounds. The challenges of hydrogen transportation are highlighted, along with potential technological approaches to address these issues. The article also outlines the practical applications of hydrogen in various sectors of the economy, particularly in energy, industry, and transport, where it can serve as an alternative to traditional fossil fuels.

The possibilities of implementing hydrogen technologies in Ukraine are discussed, taking into account its natural resource potential, existing infrastructure, and economic realities. The prospects for the development of the hydrogen industry, its role in ensuring the country's energy independence, and Ukraine's integration into the global hydrogen markets are identified.

The analysis conducted can serve as a basis for future research directions.

Keywords: *hydrogen, energy efficiency, electrolysis, energy sector, alternative fuel, efficiency assessment.*

References

1. European Commission. Воднева стратегія ЄС. Ключові дії водневої стратегії ЄС. URL: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-systems-integration/hydrogen/key-actions-eu-hydrogen-strategy_en (дата звернення: 15.12.2024).

2. U.S. Department of Energy. US Hydrogen Strategy: US National Clean Hydrogen Strategy and Roadmap. URL: https://www.hydrogen.energy.gov/docs/hydrogenprogramlibraries/pdfs/us-national-clean-hydrogen-strategy-roadmap.pdf?sfvrsn=c425b44f_5 (date of application: 15.12.2024).

3. International Energy Agency (IEA). Global Hydrogen Review 2023. URL: https://iea.blob.core.windows.net/assets/ecdfc3bb-d212-4a4c-9ff7-6ce5b1e19cef/GlobalHydrogenReview2023.pdf (date of application: 15.12.2024).

4. Ministry of Energy of Ukraine. Hydrogen Strategy of Ukraine. URL: https://www.mev.gov.ua/sites/default/files/field/file/vodneva-strategiya17.05.2024.pdf (date of application: 15.12.2024).

5. Ukrainian Hydropower. Hydropower: activity. URL: https://uhe.gov.ua/diyalnist/hidroenerhetyka (date of application: 15.12.2024).

6. Regional Gas Company. Clean Energy. URL: https://rgc.ua/ua/cleanenergy (date of application: 15.12.2024).

7. European Commission. Single market and economy. URL: https://single-market-economy.ec.europa.eu/index_en (date of application: 15.12.2024).

8. American Chemical Society. Hydrogen Energy Letters. URL: https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsenergylett.1c02591?fig=fig1&ref=pdf (date of application: 15.12.2024).

9. Dawood, F., Anda, M., & Shafiullah, G. M. Hydrogen production for energy: An overview. International Journal of Hydrogen Energy, 45(7), 3847-3869 (2020).

10. International Energy Agency (IEA). The Future of Hydrogen: Seizing today's opportunities. URL: https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen (date of application: 15.12.2024).

11. Bañares-Alcántara, R., et al. Ammonia as a hydrogen carrier for transportation and storage. Journal of Cleaner Production, 282, 124500 (2021).

12. Hydrogen Europe. The role of hydrogen in achieving carbon neutrality. URL: https://hydrogeneurope.eu (date of application: 15.12.2024).

13. Mitsubishi Corporation. Mitsubishi Corporation to Participate in Large-Scale Offshore Wind Power Generation Project in Taiwan. URL: https://www.mitsubishicorp.com/jp/en/news/release/2022/0000050341.html (date of application: 15.12.2024).

14. Chiyoda Corporation. Hydrogen Energy. URL: https://www.chiyodacorp.com/media/20220208_E_R1.pdf (date of application: 15.12.2024).

15. Techno economic analysis and performance based ranking of 3–200 kW fuel flexible micro gas turbines running on 100% hydrogen, hydrogen fuel blends, and natural gas. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652624032682 (date of application: 15.12.2024).

16. Absolute Hydrogen. Hydrogen-powered transports. URL: https://absolut-hydrogen.com/en/hydrogen-powered-transports/ (date of application: 15.12.2024).

17. International Energy Agency (IEA). Global Hydrogen Review 2024: Hydrogen demand. URL: http://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024/hydrogen-demand (date of application: 15.12.2024).

18. Alstom. Alstom Coradia iLint: The world's first hydrogen-powered train. URL: https://www.alstom.com/solutions/rolling-stock/coradia-ilint (date of application: 15.12.2024).

19. Toyota. Toyota Mirai: The future of hydrogen fuel cell vehicles. URL: https://www.toyota.com/mirai/ (date of application: 15.12.2024).

20. Airbus. Hydrogen-powered aviation: The future of zero-emission flight. URL: https://www.airbus.com/innovation/zero-emission/hydrogen.html (date of application: 15.12.2024).

21. DNV GL. Hydrogen in shipping: The potential of hydrogen fuel cells for maritime applications. URL: https://www.dnv.com/maritime/hydrogen-in-shipping.html (date of application: 15.12.2024).

22. Ministry of Energy of Ukraine. Hydrogen Strategy. URL: https://www.mev.gov.ua/sites/default/files/field/file/vodneva-strategiya17.05.2024.pdf (date of application: 15.12.2024).

23. GTS Operator of Ukraine. GTS of Ukraine. URL: https://tsoua.com/ (date of application: 15.12.2024).

24. GTS Operator of Ukraine. Consultation document on hydrogen strategy. URL: https://tsoua.com/wp-content/uploads/2021/10/Hydrogen-Consultation-paper-v2.pdf (date of application: 15.12.2024).

25. Cozzolino, R., Bella, G., & Alam, T. Electrolyzers for Energy System Stabilization: A Review. Frontiers in Energy Research. URL: https://www.frontiersin.org/journals/energy-research/articles/10.3389/fenrg.2024.1358333/full (date of application: 15.12.2024).

Надійшла: 10.03.2025
Received: 10.03.2025