

Електронний журнал «Ефективна економіка» включено до переліку наукових фахових видань України з питань економіки (Категорія «Б», Наказ Міністерства освіти і науки України № 975 від 11.07.2019). Спеціальності – 051, 071, 072, 073, 075, 076, 292.

Ефективна економіка. 2024. № 2.

DOI: <http://doi.org/10.32702/2307-2105.2024.2.34>

УДК 657.47:630

I. В. Замула,

д. е. н., професор, професор кафедри інформаційних систем в управлінні та обліку, Державний університет “Житомирська політехніка”

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6075-095X>

I. О. Скороход,

студент ОР “Магістр”, Державний університет “Житомирська політехніка”

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0009-1555-494X>

М. Ф. Журавель,

здобувач ОР “Доктор філософії”,

Державний університет “Житомирська політехніка”

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6954-4976>

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ В УКРАЇНІ

I. Zamula,

Doctor of Economic Sciences, Professor,

Professor of the Department of Information Systems in Management and Accounting,

Zhitomir Polytechnic State University

I. Skorokhod,

Student, Zhytomyr Polytechnic State University.

M. Zhuravel,

Postgraduate student, Zhitomir Polytechnic State University

EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF THE IMPLEMENTATION OF ALTERNATIVE ENERGY SOURCES IN UKRAINE

Прикладом інновацій у сфері зменшення впливу людини на навколишнє природне середовище є розвиток водневої енергетики. Використання водневих двигунів є ілюстрацією технології, яка сприяє запобіганню змінам клімату. Ці двигуни використовують водень як паливе і, під час енергетичного процесу, виділяють лише водяну пару та тепло, уникаючи викидів шкідливих газів, таких як CO₂. Такий підхід може сприяти зменшенню забруднення повітря та обмеженню впливу транспорту на зміну клімату.

Метою статті є оцінка ефективності впровадження альтернативних джерел енергії в Україні на прикладі водневої енергетики.

Під час проведення дослідження було використано різноманітні наукові методи, включаючи дедуктивні та індуктивні методи, а також систематизацію та порівняння, аналіз та синтез, а також методи причинно-наслідкових зв'язків та абстрактно-логічні методи для отримання результатів.

Результати дослідження вказують на потенціал розвитку водневих автомобілів в Україні, особливо через їхню екологічну чистоту та відповідність принципам сталого розвитку. Однак для успішного впровадження цієї інновації на ринку необхідна підтримка з боку держави для створення попиту та розвитку інфраструктури.

Стратегії BTL-комунікацій можуть допомогти привернути увагу потенційних клієнтів та зробити просування водневих автомобілів більш ефективним. У контексті виробництва водню, метод масового SMR є оптимальним на початкових етапах через низькі витрати та розвинену інфраструктуру. Щодо транспортування та зберігання водню, метод стиснення газу та зберігання в соляних печерах можуть бути більш вигідними. Проте, в довгостроковій перспективі, методи виробництва і зберігання зрідженого водню та технології на основі паливних елементів можуть стати більш конкурентоспроможними.

Важливо інвестувати в інфраструктуру, наукові дослідження та рекламу для сприяння розвитку водневих технологій в Україні. Перехід від “сірого” водню до “зеленого” вимагає поетапного підходу та врахування зростаючого інтересу до екологічно чистих технологій. Щоб досягти цього переходу, було запропоновано ряд заходів: розвиток інфраструктури, покращення технології виробництва водню, збільшення обсягів виробництва водню, встановлення податку на викиди CO₂, збільшення попиту на водневі автомобілі.

An example of innovations in the field of reducing human impact on the natural environment is the development of hydrogen energy. The use of hydrogen engines is an illustration of a technology that helps prevent climate change. These engines use hydrogen as fuel and, during the energy process, emit only water vapor and heat, avoiding the emission of harmful gases such as CO₂. This approach can help reduce air pollution and limit the impact of transport on climate change.

The purpose of the article is to evaluate the effectiveness of the introduction of alternative energy sources in Ukraine using the example of hydrogen energy.

A variety of scientific methods, including deductive and inductive methods, as well as systematization and comparison, analysis and synthesis, as well as causality and abstract-logical methods, were used in the research to obtain results.

The results of the study indicate the potential for the development of hydrogen cars in Ukraine, especially due to their environmental cleanliness and compliance with the principles of sustainable development. However, for the successful implementation of this innovation on the market, support from the state is needed to create demand and develop infrastructure.

BTL communication strategies can help attract the attention of potential customers and make the promotion of hydrogen cars more effective. In the context of hydrogen production, the bulk SMR method is optimal in the initial stages due to low costs and developed infrastructure. For the transportation and storage of hydrogen, the method of gas compression and storage in salt caves may be more advantageous.

However, in the long term, methods of production and storage of liquid hydrogen and technologies based on fuel cells may become more competitive.

It is important to invest in infrastructure, scientific research and advertising to promote the development of hydrogen technologies in Ukraine. The transition from "gray" hydrogen to "green" requires a step-by-step approach and taking into account the growing interest in environmentally friendly technologies. To achieve this transition, a number of measures have been proposed: infrastructure development, improvement of hydrogen production technology, increase in hydrogen production volume, introduction of a tax on CO₂ emissions, increase in demand for hydrogen cars.

Ключові слова: *оцінка ефективності, аналіз інвестиційної привабливості, біопаливо, воднева енергетика, водневі двигуни*

Key words: *efficiency assessment, investment attractiveness analysis, biofuel, hydrogen energy, hydrogen engines*

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. У XX-XXI століттях спостерігається значний вплив людини на навколишнє природне середовище, а саме у 2023 році частка викидів CO₂ внаслідок воєнних дій зафіксована на рівні 120 млн. тон що на 263,64 % більше, ніж в минулому році [2, 5]. Причиною такого стрімкого зростання є повномасштабне вторгнення росії в Україну.

Україна прагне виконувати свої зобов'язання згідно з міжнародними угодами, такими як Паризька угода, яка була укладена в межах Рамкової конвенції ООН про зміну клімату. Згідно з Паризькою угодою, багато країн прийняли зобов'язання досягти нульових викидів парникових газів або суттєво зменшити їх до 2050 року, зокрема такі зобов'язання взяла на себе і Україна.

Повномасштабне вторгнення росії на територію України чинить додаткове навантаження на кліматичну систему та віддаляє питання екологічної рівноваги.

Одним із шляхів покращення ситуації є впровадження інновацій у цій сфері, якими є пошук альтернативних джерел енергії, зокрема водневі двигуни.

Головною перевагою водневих автомобілів є те, що продуктом згоряння водню є вода, тому водневі автомобілі не викидають шкідливих газів, таких як вуглекислий газ, природних летких органічних речовин та інших забруднюючих речовин. За експертними оцінками, в усьому світі нараховується лише 35 тис. авто на водні, при цьому працює всього 400 станцій заправки воднем, більшість з яких фінансується за рахунок публічних коштів [18]. Втім, аналітики з глобального об'єднання "Hydrogen Council" нещодавно озвучили сміливий прогноз, згідно з яким світові обсяги виробництва авто на водневих двигунах, складуть від 3 до 5 мільйонів одиниць, а до 2030 р. – від 10 до 15 млн штук, які заправлятимуться на 10 тис. водневих АЗС [18].

Прогнози свідчать, що ця інновація має значний потенціал для досягнення амбітних кліматичних цілей. Але витрати на впровадження та просування на ринок водневих технологій, а також виробництво водню, є достатньо високими. Тому додаткового дослідження потребує оцінка ефективності впровадження альтернативних джерел енергії в Україні на прикладі водневої енергетики. На вирішення цього питання спрямована стаття.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням оцінки ефективності водневих двигунів і врахування всіх можливих аспектів при впровадженні даної технології розглядається в працях таких авторів як, В.В. Ключко [12], В.О. Колесніков[9], А.А. Лісовал [10], Р. Гончаренко [7], О. Тарасюк [17], Л.Г Мельник [13], В.І. Порфіренко[14], К. Врубель, Ю. Врубель[4], З. Стемпень [3], А.П Марченко [11]. Результати аналізу досліджень вчених вказують на різні аспекти водневого транспорту, від технічної ефективності до соціально-економічних викликів, розкриваючи потенційні переваги та визначаючи проблеми, які потребують вирішення для успішного впровадження цієї технології в Україні. Проте, питання оцінки ефективності впровадження водневої енергетики в Україні потребують додаткового дослідження.

Метою дослідження є оцінка ефективності впровадження альтернативних джерел енергії в Україні на прикладі водневої енергетики.

Виклад основного матеріалу дослідження. Перспективи впровадження автомобілів на водневих двигунах в Україні можна об'єктивно оцінити, враховуючи як їхні можливості, так і виклики. Для детального ознайомлення з потенційними перспективами та труднощами, які можуть виникнути під час впровадження цієї технології, можна скористатися SWOT-аналізом (табл. 1). SWOT-аналіз є одним із перших етапів оцінки впровадження водневих автомобілів в Україні. Даний інструмент може допомогти ідентифікувати переваги та недоліки, а також визначити перспективи та загрози, які можуть впливати на результативність самого проєкту.

Отже, основною перевагою впровадження даної технології є те, що водневі двигуни видають водяний пар і нешкідливі гази, що сприяє зменшенню викидів CO₂. Безшумність двигуна досягається шляхом реакції між воднем і киснем в результаті чого відбувається процес електрогенерації, а не згорання пального, як у традиційних двигунах внутрішнього згорання. “Щоб заправити автомобіль воднем, потрібно всього 3-5 хвилин, що подібне часу, необхідного для бензину або дизельного палива. У цьому сенсі електромобілі деградують, оскільки їм потрібно принаймні 30 хвилин для заправки”[6].

Таблиця 1. SWOT-аналіз впровадження водневих автомобілів в Україні

Переваги	Перспективи
Екологічна чистота водневих автомобілів	Стимул розвитку інноваційних технологій
Безшумність двигуна	Підтримка з боку держави
Швидке заправлення	Запобігання змінам клімату
Висока ефективність	
Можливість використання відновлювальних джерел енергії	
Недоліки	Загрози
Вартість водневих автомобілів	Нестабільне постачання водню
Нерозвинена інфраструктура	Невдосконаленість водневих автомобілів
Висока конкуренція з іншими технологіями	Значні витрати на просування на ринок

Джерело: розроблено авторами

Високий коефіцієнт корисної дії водневих автомобілів пояснюється ефективною конвертацією водню в електричну енергію в паливній елементній технології. Електрохімічна реакція між воднем і киснем генерує електроенергію, яка безпосередньо використовується для приведення в рух електромотора, забезпечуючи мінімальні енергетичні втрати порівняно з традиційними двигунами внутрішнього згоряння.

Процес використання відновлювальних джерел енергії в тому, що водень, який використовується як пальне, може бути вироблений за допомогою відновлювальних джерел енергії, таких як сонячна енергія або енергія вітру. Цей процес виробництва водню без викидів шкідливих газів може зробити водневі автомобілі більш екологічно чистими, сприяючи сталому та відновлювальному використанню енергії.

Одним із головних недоліків впровадження водневих автомобілів є їх висока вартість, що може стати значною перешкодою при широкому впровадженні даної технології. Щодо інфраструктури то для поширення водневих автомобілів в Україні необхідна певна кількість водневих заправних станцій. Низька розвиненість інфраструктури, зокрема водневих заправних станцій, може ускладнити використання таких автомобілів. Також одним із недоліків є велика конкуренція на ринку, яку водневим автомобілям поки що важко подолати через інфраструктурні обмеження та великі виробничі витрати.

Поштовхом до більш прискореного темпу поширення водневого транспорту є безпосередньо підтримка з боку держави. Основне, що входить в даний компонент це розвиток інфраструктури, а саме створення мережі водневих заправних станцій. Для створення даної мережі держава може вжити ряд заходів:

- стимулювання приватних компаній та інвесторів, щодо будівництва та утримання водневих заправок;
- розробка відповідних нормативів щодо будівництва водневих заправок;
- створення програм з метою поширення даної ідеї серед громадськості;

- підтримка науково-дослідницьких проєктів щодо вдосконалення технологій та ефективності водневих станцій.

Окрім цього однією із перспектив є те, що впровадження водневих двигунів дасть поштовх до розвитку нових технологій, що може призвести до зниження негативного впливу на довкілля, а також це стимулюватиме інновації та “зелені” технології в автомобільній промисловості.

Загрозами при впровадженні водневих автомобілів може стати нестабільне постачання самого водню. “Інфраструктура виробництва і розподілу водню потребує значних капіталовкладень, і такі інвестиції є ризикованими без довгострокової видимої перспективи попиту на водень та без гарантій (можливо політичних зобов'язань), необхідних для забезпечення ринку”[16]. Тобто має сформуватися певний попит на водневі автомобілі та відповідна інфраструктура для того щоб інвестиції були виправдані. Другою загрозою під час впровадження водневих автомобілів є їх недосконалість в частині того, що компоненти автомобіля є заважкими. “У більшості випадків всі компоненти, що містяться в автомобілі, особливо місце, яке займає водневий бак, роблять моделі, що випускаються, дуже великими” [6]. Вказаний недолік може вплинути на маневреність і динамічні характеристики безпосередньо самого автомобіля.

За результатами SWOT-аналізу встановлено, що за водневими автомобілями є велика перспектива в найближчому майбутньому в Україні. З усіх наявних переваг основним є те, що дана технологія є екологічно чистою, що відповідає принципам сталого розвитку. Але, щоб така інновація стала актуальною на ринку України необхідна підтримка з боку держави, щоб сформувався відповідний попит на даний сегмент автомобілів.

Однією із головних переваг водневих двигунів є те, що дана технологія є абсолютно екологічно чистою, адже водневі двигуни видають тільки водяну пару та тепло як продукти згорання. А викиди парникових газів в Україні у довоєнний період були доволі високими (рис. 1).

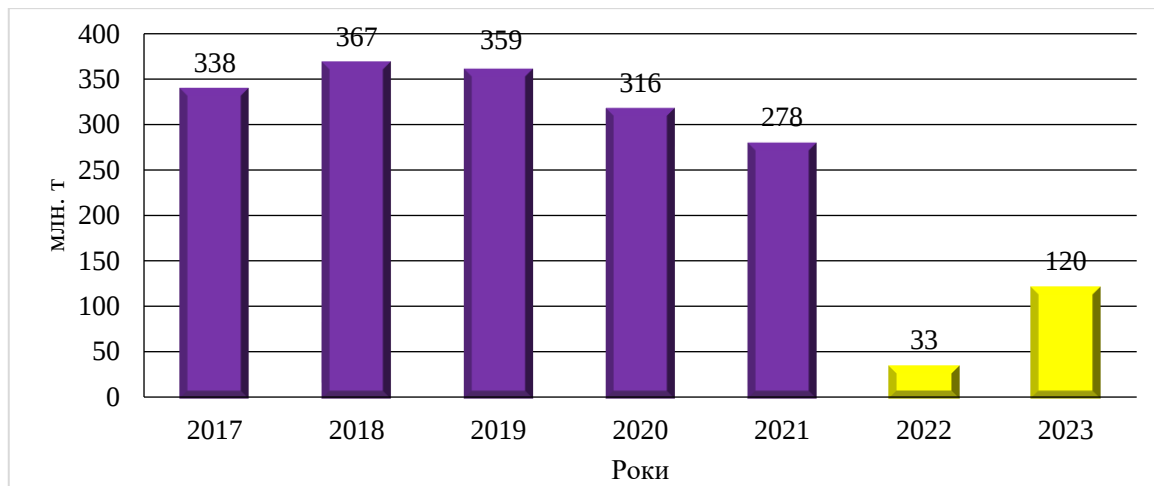


Рис. 1. Динаміка викидів парникових газів в Україні за 2017-2023 рр.

Джерело: зображено за [1, 5, 2]

Найбільша частка викидів CO₂ спостерігалася у 2018 році – 367 млн. т, а найменша у 2022 році – 33 млн. т. В цілому спостерігається позитивна тенденція так як за період повномасштабного вторгнення росії в Україну обсяг викидів CO₂ цивільними об'єктами знизився у 7 разів або на 245 млн. т. Проте значні викиди CO₂ відбуваються у результаті бойових дій, розмір яких ще належить виміряти та оцінити. Війна росії проти України ставить під загрозу можливість досягнення кліматичної нейтральності не тільки Україною, але й іншими країнами світу. Тому для України дослідження і впровадження екологічних інновацій, якими є автомобілі на водневих двигунах (частка викидів CO₂ від них нульова), є актуальними. Дана технологія може стати поштовхом до інших екологічно чистих технологій, що в свою чергу наблизить нашу країну до цілей декарбонізації.

Неабияку роль при впровадженні нових технологій відіграє реклама, що є своєрідним двигуном просування товару в наш час. Рекламу можна розглядати в контексті ATL та BTL комунікацій. ATL комунікації – це маркетингова стратегія, яка орієнтована на велику кількість аудиторії. До ATL комунікацій можна віднести рекламу на телебаченні, радіо, реклама в мережі інтернет та інше. На відмінну від ATL, комунікацій BTL – це маркетингова стратегія

спрямована на конкретну групу людей. Сюди можна віднести такі заходи як презентації, майстер класи, лекції та знижки на даний продукт. Більш детально в плані розповсюдження водневих авто в Україні буде розглянуто саме BTL комунікації.

При розповсюдженні даного сегменту автомобіля слід сконцентрувати увагу безпосередньо на потенційних клієнтах. BTL заходи, спрямовані на швидке розповсюдження водневих автомобілів на ринку України наведено у табл. 2.

Таблиця 2. BTL заходи для просування водневих авто в Україні

№	Назва BTL заходу	Дії щодо даних заходів
1.	Тест-Драйв	- організація події де люди особисто зможуть протестувати автомобіль на водневому двигуні; - проведення тест-драйвів на публічних майданчиках, на яких збирається багато людей
2.	Виставка	-забезпечення інтерактивних стендів з інформацією про водневі технології та можливістю спілкування з експертами
3.	Знижки	- надання знижок задля стимулу для переходу на водень
4.	Прямий маркетинг	- створення цікавого рекламного матеріалу та розсилання його потенційним клієнтам
5.	Партнерські угоди	- укладання партнерських угод з місцевими автосалонами, сервісними центрами та іншими підприємствами для спільних акцій і промо заходів
6.	Майстер-класи	-проведення майстер-класів та лекцій щодо використання водневих технологій, залучаючи вчених та експертів; - організація зустрічі з тими, хто вже використовує водень у своїх проєктах

Джерело: розроблено авторами

Застосування зазначених BTL комунікацій дозволить привернути увагу конкретних груп споживачів і створити більш особистий та ефективний підхід до просування водневих двигунів в Україні.

Просування водневих авто на ринок України неможливе без інвестицій. Витрати грають ключову роль при просуванні водневих автомобілів на ринок України, оскільки вони впливають на всі аспекти цього процесу, включаючи виробництво, маркетинг, інфраструктуру та сприйняття споживачів.

Детальному дослідженню підлягають витрати на кожному етапі просування водневих автомобілів на ринок.

Перший етап з якого слід розпочати – це методи виробництва водню. Є чотири найбільш поширених способів виробництва водню:

- масове виробництво водню за допомогою парового риформінгу метану (SMR);
- мале виробництво з природного газу за допомогою парового риформінгу метану (SMR);
- метод лужного електролізу (AEL);
- електроліз з протонообмінною мембраною (PEM);

Паровий риформінг метану (SMR) – це технологічний процес, призначений для виробництва водню, в якому головний компонент природного газу, метан (CH_4), взаємодіє з водяною парою (H_2O) за участю каталізатора. Цей процес призводить до утворення водню та вуглекислого газу (CO_2). SMR є ефективним методом для великосерійного виробництва водню, завдяки доступності природного газу та високому рівню конверсії метану у водень. Проте, однією з його негативних сторін є викиди вуглекислого газу (CO_2), що може стати екологічною проблемою та викликати занепокоєння у зв'язку з зусиллями по боротьбі з зміною клімату. Метод малого виробництва з природного газу за допомогою парового риформінгу метану (SMR) в основному відрізняється від масового виробництва за масштабом та потужністю установки, проте суть методу залишається незмінною.

Метод лужного електролізу (AEL) передбачає розщеплення води під впливом електричного струму у присутності лугу, такого як калійгідроксид. Метод полягає в потенційній ефективності, проте важливо зазначити, що для здійснення процесу необхідно ефективно керувати лужним середовищем, що може вимагати спеціальних умов і технічних рішень для забезпечення оптимального функціонування. Метод електролізу з протонообмінною мембраною (PEM) застосовує спеціальну мембрану для розділення молекул

води на водень і кисень під впливом електричного струму. РЕМ-електроліз відзначається високою ефективністю та швидкістю реакції, роблячи його особливо підходящим для виробництва водню при невеликих потужностях.

Визначення того, який метод виробництва водню є ефективнішим на початковому етапі для водневих авто, залежить від ряду факторів, таких як енергетична ефективність, вартість виробництва, доступність вихідних матеріалів та інші технічні й економічні обставини. Основні показники оцінки технологій виробництва водню за вказаними методами виробництва наведено у табл. 3.

Таблиця 3. Показники оцінки основних технологій виробництва водню

<i>Показник</i>	<i>SMR масове</i>	<i>SMR мале</i>	<i>Електроліз AEL</i>	<i>Електроліз РЕМ</i>
Інвестиційні витрати, €/кВт	—	—	1000	1400
Інвестиційні витрати до 2030 р., €/кВт	—	—	370-800	250-1270
Ефективність, %	70-85	60-65	61-67	65-78
Витрати, €/кг H ₂	1,0-1,5	4,0-5,0	5,0-5,5	6,0-6,5
Витрати до 2030 р., €/кг H ₂	—	3,0-4,0	3,0-3,5	

Джерело: сформовано за [16, с. 31]

Згідно з даними табл. 3 на початкових етапах просування водневих двигунів в Україні може бути доцільно розглядати масове SMR через його низькі витрати на 1 кг H₂ (€1,0-1,5) та високу ефективність 70-85 %. Даний метод буде набагато ефективніший від методів отримання водню на основі електролізу. Однак експерти дають хороші прогнози з приводу перспектив виробництва водню AEL і РЕМ. “Інвестиційні витрати на РЕМ електроліз наразі складають близько € 1400 за кВт. Збільшення масштабів виробництва може швидко скоротити витрати. Ринкові оцінки на 2030 рік – € 760 за кВт, хоча широко варіюються від € 250 до € 1270 за кВт. Споживання електроенергії системами РЕМ в даний час незначно вищі за AEL. Проте, ці показники швидко покращуються, і, як очікується, споживання електроенергії знизиться до рівня значно менше 50 кВт·год/кг у 2030 році (ефективність більше 70 %).

Припускаючи максимальну кількість робочих годин на рік та витрати на електроенергію в розмірі 70-80 € за МВт-год, поточні виробничі витрати оцінюються в € 5-5.5 за кг H_2 і € 6- 6.5 за кг H_2 для AEL та PEM відповідно. Очікується, що витрати до 2030 року становитимуть близько 3-€ 3.5 за кг H_2 на виробничому майданчику. До цього часу також з'являться великі установки потужністю 10-100 МВт (4-40 тонн H_2 на добу), можливо й більше, і будуть розташовані централізовано. Це може призвести до зниження витрат на виробництво до € 3 за кг і, можливо, навіть до € 2 за кг. Тоді витрати стануть конкурентоспроможними при централізованому виробництві з використанням природного газу, особливо, якщо ціни на природний газ та CO_2 будуть збільшуватися, а виробництво повинно поєднуватися з технологією уловлювання та зберігання вуглецю” [16, с. 30].

Тому за методами AEL та PEM велике майбутнє, зокрема і в Україні, але для цього необхідно здійснити низку заходів щодо зменшення витрат на дані методи: масштабування виробництва, технологічні удосконалення та оптимізація процесів.

Зберігання та транспортування водню – це один із ключових аспектів водневої інфраструктури, які впливають на ефективність і конкурентоспроможність водневої енергетики. При виборі більш вигідного способу потрібно відштовхуватись від наявних ресурсів які доступні в Україні на даний момент. В табл.4 наведено приблизну вартість водневих технологій на основі яких буде підібрано найоптимальніший варіант для зберігання та транспортування водню на початкових етапах впровадження.

Виходячи з аналізу, кращим варіантом транспортування та зберігання водню в Україні на даний момент є методи стиснення газу і зберігання в соляних печерах або в ємностях, що можуть стати вигідними варіантами на початкових етапах. Дані методи у вартості є відносно оптимальними 0,48/0,34/0,38 дол. США/ кг та 0,22-0,26 дол. США/ кг відповідно. Перевагами методів є те, що є вся необхідна інфраструктура для зберігання та

транспортування водню на початкових етапах просування водневих авто в Україні.

Таблиця 4. Наявна й очікувана вартість водневої технології

<i>Технологія</i>	<i>Наведена вартість</i>	<i>2018 р.</i>	<i>2025 р.</i>
Виробництво газоподібного палива з кам'яного вугілля з вловлюванням і зберіганням вуглецю	Нормована вартість тепла (LCOH), \$/ кг	2,57-3,14	2,02-2,47
Стиснення газу і зберігання в ємностях / танках (35/150/350 бар)	LCOH, \$/ кг	0,48/0,34/0,38	0,41/0,26/0,27
Стиснення газу і зберігання в соляних печерах	LCOH, \$/ кг	0,22-0,26	0,16-0,20
Виробництво і зберігання аміаку з відновленням водню	LCOH, \$/ кг	1,39-1,68	1,10-1,33
Виробництво і зберігання зрідженого водню	LCOH, \$/ кг	2,57-3,14	1,59-1,94
Паливні елементи	LCOE, \$/МВт. ч (Наведена вартість енергії)	330-410	120-150
Електромобілі на паливних елементах	LCOT автомобіль, \$/ тонна-кілометр (LCOT = повна наведена вартість транспортування)	1,29-1,57	0,63-0,77
	LCOT автомобіль, \$/ тонна-кілометр	2,66-3,25	1,66-2,02

Джерело: сформовано за [16, с. 94]

В довгостроковій перспективі якщо інфраструктура буде нарощуватися, то можна розглядати методи виробництва і зберігання зрідженого водню та метод на основі паливних елементів. Перевагами даних методів є те, що вони зменшують об'єми для зберігання водню, що полегшує саме транспортування та є більш екологічно чистими. Недоліками є те, що дані методи є енергозатратними та на даний момент для них недостатньо розвинута інфраструктура. Також перспективним варіантом є транспортування водню через трубопровід. Даний варіант дозволить проводити експорт водню до країн ЄС (Румунії, Словаччини, Угорщини, Польщі), що є великим кроком для України на шляху до декарбонізації та нарощування експорту. В даний час цей

проект доволі важко втілити у зв'язку з військовими діями в Україні, тому потрібно залучати не тільки внутрішні інвестиції але й зовнішні, що значно покращить ситуацію стосовно постачання водню.

Розвиток інфраструктури, здійснення наукових досліджень і застосування реклами відіграють важливу роль у просуванні водневих автомобілів в Україні. Зазначене є важливими кроками, адже від них залежить формування подальшого попиту на водневі автомобілі в Україні. Взаємодія цих аспектів дозволяє створити ефективне середовище для сприйняття та розвитку водневих автомобілів в Україні. В табл. 5 наведено дії країн світу на шляху до кліматичного нейтралітету та скільки на це інвестується коштів.

Таблиця 5. Аналіз найкращих міжнародних практик щодо впровадження водневих двигунів

<i>Країна</i>	<i>Стратегічний напрям впровадження водневих двигунів</i>	<i>Інвестиції</i>
США	Розробка дорожньої карти водневої економіки; перехід до виробництва водню з відновлюваних джерел до 2030 р.	8 млрд. доларів
Норвегія	Підтримка ринку водню для транспорту та кораблів через Фонд NOx та "Enova"	12,4 млн. доларів
Італія	Впровадження зони збору за дорожні затори в Мілані; дослідження технологій відновлюваних джерел для автобусного транспорту; замовлення 6 поїздів на водневому паливі	160 млн. євро
Нідерланди	Оголошена стратегія для обіймання позиції світового лідера у використанні “зеленого” водню; план перехідного етапу виробництва “зеленого” водню	35 млн. євро
Португалія	Прямуювання до досягнення 5 % рівня споживання водню автомобілями до 2030 р.	6500 млн. євро

Джерело: сформовано за [16, 15]

Наведені у табл. 5 приклади свідчать про широкий спектр стратегій і значні інвестиції, зокрема у розробку інфраструктури, дослідження та стимулювання виробництва “зеленого” водню. Для України може бути корисним вивчення та використання подібних підходів для сприяння розвитку водневих технологій і підтримки відповідних галузей. Для цього необхідно інвестувати у вказану галузь великі кошти та приділити значну увагу просуванню водневих авто на ринок.

Після усіх пройдених етапів формується ціна на водень. Наразі вартість “сірого” водню (на основі викопного палива) приблизно складає 1,50 євро/кг, вартість “блакитного” водню (на основі природного газу з уловлюванням вуглецю) становить 2 євро/кг, вартість “зеленого” водню на даний час сягає від 3 до 6 євро/кг. Проте аналітики дають сміливий прогноз з приводу ціни на “зелений” водень. Зазначається, що “на сьогодні ціна зеленого водню – це 3-6 доларів за кг. Це на порядок більше, ніж вартість палива, до якого всі звикли. Проте за дослідженнями, до 2030 року ціна впаде до 1,4 долара, а до 2050 – до 80 центів за кг” [8].

На початкових етапах впровадження водневих авто на ринок України більш економічно доцільним використати саме “сірий” водень з метою поступового переходу на “зелений” водень. Важливо зрозуміти чи буде дана технологія конкурентоспроможна на початкових етапах. Однак з плином часу і зростанням вимог до екологічно чистих технологій, може збільшитися інтерес до “зеленого” та “блакитного” водню, навіть за умови збільшення вартості їхнього виробництва. Для того щоб даний перехід відбувся необхідно вжити ряд заходів: розвиток інфраструктури, покращення технології виробництва водню, збільшення обсягів виробництва водню, встановлення податку на викиди CO₂, збільшення попиту на водневі автомобілі.

Для моніторингу запропонованих ініціатив потрібно розробити систему показників, яка надасть змогу визначити чи ефективно відбувається впровадження водневих авто в Україні. За допомогою системи КРІ (ключові показники ефективності) можна визначити результативність даного проєкту. КРІ дозволяють визначити, наскільки ефективно досягаються стратегічні цілі та завдання. Розробка та використання КРІ допомагає проєктам тримати під контролем свої результати, визначати області для удосконалення та приймати обґрунтовані рішення для досягнення стратегічних цілей. У табл. 6 наведено індикатори, які сприятимуть моніторингу досягнення цілей, що були визначені для впровадження водневих автомобілів в Україні.

Таблиця 6. KPI показники впровадження водневих авто на ринок України

<i>№ з/п</i>	<i>Ціль</i>	<i>KPI</i>
1	Збільшити обсяги продажів водневих авто на 20 %	Збільшити продажі водневих авто мінімум на 50 одиниць
2	Залучити не менше 10 нових дилерських центрів у визначений період	Залучити мінімум 10 нових дилерських центрів з метою подальшої співпраці та просування водневих авто
3	Розширити мережу водневих заправок	Збудувати мінімум 10 нових водневих заправок по всій території України
4	Збільшити рентабельність водневих авто на 50%	Проведення мінімум 200 виставок водневих авто по всій території України. Проведення мінімум 100 тест-драйвів по всій території України
5	Зробити процес купівлі та експлуатації водневих авто максимально зручним	Розробка та запуск мобільного додатку для власників водневих авто, який надасть зручний доступ до сервісних послуг, інформації про заправки та технічний стан автомобіля

Джерело: розроблено авторами

У табл. 6 наведено цілі та відповідні ключові показники ефективності (KPI), якими слід керуватися для оцінки досягнення поставлених завдань щодо впровадження водневих авто в Україні. Дані показники дадуть змогу чіткого моніторингу ситуації щодо того наскільки ефективно відбувається процес просування водневих технологій на ринок України. Постійне відстеження показників та аналіз результатів дозволяє вчасно виявляти проблеми та вносити корективи в даний проєкт .

Висновки та перспективи подальших досліджень. Інновації у сфері зменшення впливу людини на навколишнє природне середовище часто включають в себе розробку нових технологій і стратегій, спрямованих на зниження викидів шкідливих речовин, оптимізацію використання ресурсів і поліпшення загальної екологічної ефективності. Прикладом таких інновацій є розвиток водневої енергетики.

Використання водневих двигунів є ілюстрацією технології, яка сприяє запобіганню змінам клімату. Ці двигуни використовують водень як пальне і, під час енергетичного процесу, виділяють лише водяну пару та тепло,

уникаючи викидів шкідливих газів, таких як CO₂. Такий підхід може сприяти зменшенню забруднення повітря та обмеженню впливу транспорту на зміну клімату.

Результати дослідження вказують на потенціал розвитку водневих автомобілів в Україні, особливо через їхню екологічну чистоту та відповідність принципам сталого розвитку. Однак для успішного впровадження цієї інновації на ринку необхідна підтримка з боку держави для створення попиту та розвитку інфраструктури.

Стратегії BTL-комунікацій можуть допомогти привернути увагу потенційних клієнтів та зробити просування водневих автомобілів більш ефективним. У контексті виробництва водню, метод масового SMR є оптимальним на початкових етапах через низькі витрати та розвинену інфраструктуру. Щодо транспортування та зберігання водню, метод стиснення газу та зберігання в соляних печерах можуть бути більш вигідними. Проте, в довгостроковій перспективі, методи виробництва і зберігання зрідженого водню та технології на основі паливних елементів можуть стати більш конкурентоспроможними.

Важливо інвестувати в інфраструктуру, наукові дослідження та рекламу для сприяння розвитку водневих технологій в Україні. Перехід від “сірого” водню до “зеленого” вимагає поетапного підходу та врахування зростаючого інтересу до екологічно чистих технологій. Щоб досягти цього переходу, було запропоновано ряд заходів: розвиток інфраструктури, покращення технології виробництва водню, збільшення обсягів виробництва водню, встановлення податку на викиди CO₂, збільшення попиту на водневі автомобілі.

Встановлення конкретних цілей та моніторинг їхнього досягнення через ключові показники ефективності є важливим етапом оцінки успішності проєкту впровадження водневих автомобілів в Україні. Постійний аналіз результатів дозволяє вчасно виявляти та вирішувати проблеми для подальшого розвитку водневої галузі.

Література

1. Greenhouse Gas Emissions in Ukraine (2010 - 2021). *GlobalData*. 2022. URL: <https://www.globaldata.com/data-insights/macroeconomic/greenhouse-gas-emissions-in-ukraine-2096019/#:~:text=> (дата звернення: 10.01.2024).
2. 120 млн тонн викидів за рік. Війна росії проти України віддаляє світ від кліматичної нейтральності. *Інтерфакс-Україна*. URL: <https://interfax.com.ua/news/blog/937662.html> (дата звернення: 13.12.2023).
3. Stępień Z. A comprehensive overview of hydrogen-fueled internal combustion engines: Achievements and future challenges. *Energies*, 2021. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/20/6504/pdf>
4. Wróbel, K., Wróbel, J., Tokarz, W., Lach, J., Podsadni, K., Czerwiński, A. (2022). Hydrogen internal combustion engine Vehicles: A review. *Energies*, 15 (23), 8937. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/23/8937/pdf>
5. Белоусова К.В. Україні через війну кількість викидів вуглецю зросла на чверть. *ЕкоПолітика*. 2022. URL: [https://ecopolitic.com.ua/ua/news/v-ukraini-cherez-vijnu-kilkist-vikidiv-vuglecju-zroslo-na-chvert/#:~:text=](https://ecopolitic.com.ua/ua/news/v-ukraini-cherez-vijnu-kilkist-vikidiv-vuglecju-zroslo-na-chvert/#:~:text=%) (дата звернення: 21.12.2023).
6. Водневі автомобілі: які вони, характеристики, переваги і недоліки. *Renovables Verdes*. URL: https://www.renovablesverdes.com/uk/водневі-автомобілі/#google_vignette (дата звернення: 20.12.2023).
7. Гончаренко Р., Любимова Н.О. Воднева енергетика: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Молодь і технічний прогрес в АПВ». 2021. URL: https://repo.btu.kharkov.ua/bitstream/123456789/39788/1/Molod_i_tekhn_prohres_v_APV_T2_2021_267-270.pdf
8. Зануда А. Зелений водень для України та світу. *BBC News Україна*. URL: <https://www.bbc.com/ukrainian/features-58722468#:~:text=На%20сьогодні%20ціна%20зеленого%20водню,до%2080%20центів%20за%> (дата звернення: 15.12.2023).
9. Колесніков В.О. Впровадження водневих технологій на транспорті та суміжних галузях: Матеріали XVI Міжнародної науково-практичної

конференції «Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту», (Вінниця, 23-25 жовтня 2023 року). ВНТУ, 2023. 396 с. URL: <https://cutt.ly/2wC2OGuX>

10. Лісовал А.А. Передумови використання водню в Україні в енергетичній та автомобільній галузях. *Двигуни внутрішнього згоряння*, 2023, № 1, с. 11-17. URL: <http://dvs.khpi.edu.ua/article/view/287093/281721>

11. Марченко А.П. Відбудова критичних галузей економіки України використанням в енергетичних установках зеленого водню: Матеріали п'ятої Всеукраїнської науково-практичної конференції «Євроінтеграція екологічної політики України». Одеса: Одеський державний екологічний університет, 2023. 552 с., с. 43. URL: <https://cutt.ly/mwC2PaeZ>

12. Ключко В.В. Перспективи розвитку водневого транспорту порівняно з електромобілями. *Машинобудування*. URL: <https://cutt.ly/4wC2Pc9m>

13. Мельник Л.Г. Економічне обґрунтування використання інноваційних технологій на транспорті. 2022. URL: https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream/123456789/88023/1/Melnyk_innovative_transport.pdf

14. Порфіренко В.І.; Норець С.Р. Перспективи розвитку та експлуатації електро- та водневого автотранспорту. Матеріали XVI Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту», (Вінниця, 23-25 жовтня 2023 року). ВНТУ, 2023. 396 с. URL: <https://cutt.ly/2wC2OGuX>

15. Проєкт Дорожньої карти використання водню в Україні, 2021. URL: <http://surl.li/qjetw> (дата звернення: 01.02.2024).

16. Проєкт Дорожньої карти виробництва водню в Україні. URL: <http://surl.li/qjeug> (дата звернення: 17.12.2023).

17. Тарасюк О., Бойченко С. Світові досягнення та перспективи упровадження технологій генерування та акумулювання водню як моторного палива: матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції «Поступ в нафтогазопереробній та нафтохімічній промисловості». Львів: Львівська політехніка, 2022. 330 с., с. 60. URL: <http://surl.li/qjeuo>

18. Тітамир О. Транспорт на водні: чи реалістичні перспективи для світу й України? *Рубрика*. URL: <https://rubryka.com/blog/transport-na-vodni/> (дата звернення: 30.11.2023).

References

1. GlobalData (2022), “Greenhouse Gas Emissions in Ukraine (2010 - 2021)”, available at: <https://www.globaldata.com/data-insights/macroeconomic/greenhouse-gas-emissions-in-ukraine-2096019/#:~:text=> (Accessed 10 Jan 2024).

2. Interfax-Ukraine (2024), “120 million tons of emissions per year. Russia's war against Ukraine is moving the world away from climate neutrality”, available at: <https://interfax.com.ua/news/blog/937662.html> (Accessed 13 Dec 2023).

3. Stępień, Z. (2021), “A comprehensive overview of hydrogen-fueled internal combustion engines: Achievements and future challenges”, *Energies*, available at: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/20/6504/pdf> (Accessed 10 Jan 2024).

4. Wróbel, K., Wróbel, J., Tokarz, W., Lach, J., Podsadni, K. and Czerwiński, A. (2022), “Hydrogen internal combustion engine Vehicles: A review”, *Energies*, 15(23), available at: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/23/8937/pdf> (Accessed 12 Jan 2024).

5. Belousova, K.V. (2022), “Due to the war in Ukraine, the amount of carbon emissions increased by a quarter”, *Ekopolityka*, available at: <https://ecopolitic.com.ua/en/news/v-ukraini-cherez-vijnu-kilkist-vikidiv-vuglecju-zroslo-na-chvert-2/> (Accessed 21 Dec 2023).

6. Renovables Verdes (2023), “Hydrogen cars: what they are, characteristics, advantages and disadvantages”, available at: https://www.renovablesverdes.com/uk/водневі-автомобілі/#google_vignette (Accessed 20 Dec 2023).

7. Honcharenko, R. and Liubymova, N.O., (2021), “Hydrogen power generation”, *Materialy Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii “Molod i tekhnichniy prohres v APV”* [Materials of the International Scientific and Practical Conference “Youth and technical progress in APV”], available at:

https://repo.btu.kharkov.ua/bitstream/123456789/39788/1/Molod_i_tekhn_prohres_v_APV_T2_2021_267-270.pdf (Accessed 10 Jan 2024).

8. Zanuda, A., (2023), "Green hydrogen for Ukraine and the world", BBC News Ukraine, available at: [https://www.bbc.com/ukrainian/features-58722468#:~:text=На%20сьогодні%20ціна%20зеленого%20водню,до%2080%20центів%20за%](https://www.bbc.com/ukrainian/features-58722468#:~:text=На%20сьогодні%20ціна%20зеленого%20водню,до%2080%20центів%20за%20) (Accessed 05 Feb 2024).

9. Kolesnikov, V.O., (2023), "Implementation of hydrogen technologies in transport and related industries", *Materialy KhVI Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii "Suchasni tekhnolohii ta perspektyvy rozvytku avtomobilnoho transportu"* [Materials of the 16th International Scientific and Practical Conference "Modern technologies and prospects for the development of road transport"], available at: <https://cutt.ly/2wC2OGuX> (Accessed 10 Jan 2024).

10. Lisoval, A.A. (2023), "Prerequisites for the use of hydrogen in Ukraine in the energy and automotive industries", *Internal Combustion Engines*, vol. 1, available at: <http://dvs.khpi.edu.ua/article/view/287093/281721> (Accessed 01 Feb 2024).

11. Marchenko, A.P. (2023), "Reconstruction of critical sectors of the economy of Ukraine using green hydrogen in power plants", *Materialy p'iatoi Vseukrains'koi naukovo-praktychnoi konferentsii «Yevrointehratsiia ekolohichnoi polityky Ukrainy»*, [Materials of the fifth All-Ukrainian scientific and practical conference "European integration of environmental policy of Ukraine"], available at: <https://cutt.ly/mwC2PaeZ> (Accessed 22 Jan 2024).

12. Kluiko, V. (2022), "Prospects for the development of hydrogen transport in comparison with electric vehicles", *Mashynobuduvannia*, available at: <https://cutt.ly/4wC2Pc9m> (Accessed 03 Feb 2024).

13. Melnyk, L.G. (2022), "Economic justification of the use of innovative technologies in transport", available at: https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream/123456789/88023/1/Melnyk_innovative_transport.pdf (Accessed 19 Jan 2024).

14. Porfirenko, V.I. and Norets, S.R. (2023), "Prospects for the development and operation of electric and hydrogen vehicles", *Materialy XVI Mizhnarodnoi*

naukovo-praktychnoi konferentsii “Suchasni tekhnolohii ta perspektyvy rozvytku avtomobilnoho transportu” [Materials of the 16th International Scientific and Practical Conference “Modern technologies and prospects for the development of road transport”], available at: <https://cutt.ly/2wC2OGuX> (Accessed 10 Des 2023).

15. Department of Sustainable Transport of the UNECE, the Ministry of Energy of Ukraine and the State Agency of Ukraine for Energy Efficiency and Energy Saving (2021), “Draft Roadmap for the use of hydrogen in Ukraine”, available at: <http://surl.li/qjetw> (Accessed 01 Feb 2024).

16. Department of Sustainable Transport of the UNECE, the Ministry of Energy of Ukraine and the State Agency of Ukraine for Energy Efficiency and Energy Saving (2021), “Draft Roadmap for Hydrogen Production in Ukraine”, available at: <http://surl.li/qjeug> (Accessed 17 Des 2023).

17. Tarasiuk, O. and Boichenko, S. (2022), “World achievements and prospects for the introduction of technologies for the generation and accumulation of hydrogen as a motor fuel”, *Materialy XI Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii “Postup v naftohazopererobnii ta naftokhimichnii promyslovosti”* [Materials of the XI International Scientific and Technical Conference “Progress in the oil and gas processing and petrochemical industry”], available at: <http://surl.li/qjeuo> (Accessed 10 Des 2023).

18. Titamyr, O. (2023), “Hydrogen transport: are the prospects realistic for the world and Ukraine?”, Rubric, available at: <https://rubryka.com/blog/transport-na-vodni/> (Accessed 30 Nov 2023).

Стаття надійшла до редакції 11.02.2024 р.