

А.А. Лісовал

ПЕРЕДУМОВИ ВИКОРИСТАННЯ ВОДНЮ В УКРАЇНІ В ЕНЕРГЕТИЧНІЙ ТА АВТОМОБІЛЬНІЙ ГАЛУЗЯХ

В статті на підставі світових тенденцій обґрунтовано місце водню і водневих технологій в подальших процесах декарбонізації енергетики і автомобільного транспорту України. Різноманітність способів виробництва, транспортування та зберігання, використання водню різної чистоти вимагають складних компромісних рішень між вартістю технології і кількістю можливих викидів шкідливих речовин у довкілля на всіх сукупних етапах застосування цих технологій. Водневе паливо і водневі технології слід позиціонувати як один із напрямів енергетичного переходу галузей економіки на рейки декарбонізації, що приведе до створення кліматично нейтральних технологій. Традиційні поршневі двигуни внутрішнього згорання можна модернізувати для роботи на суто водневому паливі, але це потребує застосування нових матеріалів через високу питому енергоємність водню. На шляху спалювання водню в камерах згорання ДВЗ стоять обмеження на викиди оксидів азоту NO_x . Можливий варіант використання суміші водню з природним газом або модернізація двопаливних ДВЗ. Це найбільш реалістичний варіант на поточний час для України. В світлі процесів декарбонізації, головною перевагою паливних елементів (ПЕ) є відсутність згорання вуглеводнів і відповідно можливість зменшити забруднення атмосферного повітря парниковим газом CO_2 . Існуючі ПЕ можуть працювати не лише на водні, а і на природному газі. В енергетиці водневі технології конкурують не з традиційними способами отримання тепла та електричної енергії, а з біоенергетикою, з тепловими насосами, з технологіями уловлювання та зберігання вуглецю та його оксидів. В автомобільній галузі водневі технології конкурують з рідкими і газоподібними біопаливами, електромобілями та гібридами з ДВЗ і акумуляторами. Потенціальні можливості застосування водневих технологій для процесів декарбонізації розкриються тільки після створення ринку продажу водню та відповідної інфраструктури. На сегмент і ціну застосування водневих технологій впливає спосіб вибраного процесу виробництва, складових інфраструктури, які включають зберігання, транспортування і заправні станції. Безпечна експлуатація і впровадження водневих технологій в Україні потребує кваліфікованих інженерних кадрів. Підготовку таких спеціалістів для енергетики і транспорту можуть взяти на себе університети за спеціальністю 142 – енергетичне машинобудування.

Ключові слова: водень; воднева технологія; паливний елемент; двигун внутрішнього згорання; енергетика; автомобіль; автобус.

Вступ

Поштовхом для написання статті було повідомлення в 2022 р. про 90-річчя з початку робіт над створенням паливних елементів, які в іноземних літературних джерелах мають назву FuelCell. Паливні елементи (ПЕ) пройшли шлях від апробації у космічних технологіях до використання на підводних човнах, автомобілях, в електронній галузі у якості основних (портативна продукція електроніки) і резервних джерел живлення струмом і в енергетиці для вироблення електроенергії та тепла.

У більшості випадків ПЕ пов'язують з воднем, з водневою технологією, з одним із напрямів декарбонізації галузей економіки. Все це є пріоритетними напрямками досліджень для світового наукового співтовариства. Відповідно багато наукових лабораторій Академії наук України займаються дослідженнями за цією актуальною проблематикою [1, 2].

В світлі процесів декарбонізації, головною перевагою ПЕ є відсутність згорання вуглеводнів і, відповідно, можливість зменшити забруднення атмосферного повітря парниковим газом CO_2 . Існуючі ПЕ можуть працювати не лише на водні, а і на природному газі.

Слід нагадати, що деякі конструкції ПЕ ефективно працюють лише за високих температур елек-

троліту (до $1000^\circ C$), а це теплове забруднення довкілля.

Для отримання тепла і електроенергії водень можна спалювати безпосередньо в камерах згорання двигунів внутрішнього згорання і топках котлів і також будуть відсутні прямі викиди (у відпрацьованих газах) CO_2 . Непрямі викиди CO_2 залежать від технології отримання водню. Гібридне поєднання ДВЗ і ПЕ розширює можливості когенераційних технологій [2].

Водень широко використовується як сировина у нафтогазовій та хімічній промисловості при виробництві аміаку, добрив для сільського господарства, нафтопродуктів. Одночасно водень отримують як побічний продукт в деяких технологічних процесах, наприклад, при виробництві хлору.

Для обґрунтування місця водню і водневих технологій в світовому процесі декарбонізації галузей економіки і відповідно зменшенні викидів CO_2 за даними роботи [3] складена табл. 1, де наведено частки річних викидів CO_2 за галузями економік різних країн. Декарбонізації потребують сектори економік, які широко використовують викопне паливо – це індустріальні технологічні процеси, енергетична галузь з виробництвом електроенергії і тепла для опалення, транспорт.

В промисловості на шляху до декарбонізації стоїть дві проблеми. Перша – в розвинених країнах вже впроваджені передові енергозберігаючі технології, які максимально скоротили використання

викопного палива. Друга – ризики інвестування в новітнє технологічне обладнання, без гарантій його досконалості та довговічності.

Таблиця 1. Частки (у відсотках) річних викидів CO₂ за галузями економік різних країн

Країни	Промисловість	Сільське господарство	Електроенергія і тепло	Транспорт	Інше
Китай	40	10	37	7	6
США	38	9	12	29	12
Євросоюз	36	16	17	31	–
Індія	34	25	22	8	11
Бразилія	9	59	11	18	3
Індонезія	8	78	4	6	4
Японія	48	2	24	18	8
Середні значення у світі	32	19	19	18	12

Більш сприятлива ситуація до продовження процесів декарбонізації в енергетиці та на транспорті. На частку автомобілів у транспортній галузі припадає найбільша частка викидів парникових газів, бо половина попиту на енергію у світових перевезеннях припадає на легкові автомобілі. За даними роботи [4] кількість легкових автомобілів у 2050 р. зросте з 1 до 2,5 млрд. Країни Євросоюзу мають план до 2030 р. зменшити викиди CO₂ від транспорту на 50 %. Але дані роботи [5] свідчать про невиконання цільового показника (у 10 %) із залучення відновлювальних джерел енергії у транспортній галузі.

Мета статті – обґрунтування місця водню і водневих технологій в подальших процесах декарбонізації енергетики і автомобільного транспорту України. Різноманітність способів виробництва, транспортування та зберігання, використання водню різної чистоти вимагають складних компромісних рішень між вартістю технології і кількістю можливих викидів шкідливих речовин у довкілля на всіх супутніх етапах застосування цих технологій.

Технології виробництва, зберігання і транспортування водню

За даними роботи [6] за останні десять років у світі виробляється 45 – 65 Мт (за рік) водню для потреб хімічної і нафтохімічної галузей. Близько 50 % такого водню виробляють паровою конверсією (риформінг) природного газу, приблизно 30 % – способом окислення сирої нафти, 18 % – газифікацією вугілля, і лише 4 % – електролізом води. Ведуться розробки технологій виробництва водню з використанням високотемпературного парового електролізу, з використанням енергії сонця (штучний фотосинтез) для розщеплення води, виробництва із біологічної сировини [1].

Парова конверсія метану забезпечує виділення відносно чистого водню та оксиду вуглецю CO у співвідношенні масових часток 3 : 1. Але для ефективності хімічної реакції необхідне безперервне підведення теплоти. На відміну від цього способу, часткове окислення вуглеводнів, газифікації вугілля або біомаси потребують попередньої обробки відповідних палив і додаткової очистки водню.

За даними робіт [7, 8, 9] складена табл. 2, яка дає можливість порівняти ефективність способів виробництва і оцінити витрати енергії на технологічні процеси отримання водню.

Таблиця 2. Порівняння ефективності технологій отримання водню

Назва технології	ККД, %	Витрати енергії, кВт·год на 1 кг H ₂
Риформінг метану	72	44 – 51
Електроліз	61	50 – 65
Газифікація вугілля	56	51 – 74
Газифікація біомаси	46	69 – 76

Для отримання водню «електролізом води» застосовують лужні, твердо полімерні та твердо оксидні (керамічні) електролізери. Найбільш надійними і дешевими є лужні електролізери, їх блочні конструкції досягають потужності у декілька МВт. Лужний електроліт знаходиться між анодом і катодом, на які подається постійний струм. Твердо полімерні електролізери стали комерційно доступними з 2000-х років, швидко розвиваються, мають вихідний тиск водню до 8 МПа, але дорожчі за лужні. Твердо оксидні електролізери використовують керамічний електроліт, мають найвищий ККД, але працюють за високих

температур (700 – 900°C) і, відповідно, найменш довговічні.

Потужною перепоною на шляху розвитку і поширенню водню і водневих технологій в процесах декарбонізації галузей економік є рентабельність отримання водню при використанні «зелених» технологій, відновлювальних джерел енергії. На заохочення виробництва водню в країнах Євросоюзу вплинули внесені в 2022 р. зміни до Регламенту «зеленої» класифікації (GreenDeal). В Регламенті, на обмежений у часі перехідний період, була визнана чистою електроенергія, вироблена з ядерного палива і природного газу у існуючому виді [10]. Ця ситуація на користь нарощування виробництва водню у перспективі може бути використана і в Україні, яка планує за підтримки Євросоюзу у післявоєнний час відновити та модернізувати електростанції, газові транспортні мережі та збудувати нові блоки на атомних електростанціях (АЕС).

Найчастіше на промислових і хімічних підприємствах водень зберігають стисненим у резервуарах високого тиску (до 75 МПа). На автомобілях для зберігання стиснутого водню застосовують балони з тисками 35 МПа або 70 МПа. Для заправки воднем автомобілів на заправних станціях створюються тиски 50 МПа або 90 – 95 МПа відповідно.

Транспортування водню у газових балонах під тиском апробований спосіб і потребує менше витрат енергії на процес стискання, ніж процес зрідження. Однак при великих об'ємах продажу водню для транспортування його морським і наземним транспортом застосовують зріджений водень, який має більшу питому енергоємність. В США більше 90 % водню на продаж транспортують у зрідженому стані у спеціальних криогенних балонах. Як результат узагальнення літературних даних робіт [7, 9] наведена табл. 3, яка дає змогу оцінити енерговитрати для різних способів зберігання водню.

Таблиця 3. Порівняння енерговитрат для технологій зберігання водню

Технологія зберігання водню	Витрати енергії, кВт·год на 1 кг H ₂
Стискання до 50 МПа	до 2,6
Стискання до 90 МПа	до 3,5
Зрідження	11 – 13

Вважається, що на зрідження витрачається третина енергії від загальної кількості, вміщеної в 1 кг водню.

В Україні існує розвинена інфраструктура транспортування природного газу, яка включає

мережу трубопроводів. Відповідно в світі працюють над альтернативною технологією зберігання і транспортування водню – змішування водню з природним газом і транспортування суміші по існуючим трубопроводам. Дослідження [11, 12] засвідчили можливість такого способу сумішевого зберігання, якщо об'ємна частка водню у суміші буде обмежена 10 – 20 %.

За великих об'ємів виробництва водню деякі науковці пропонують зберігати і транспортувати його попередньо перетворивши в метан. Перетворення водню в метан – це зворотній цикл парової конверсії метану, який потребує дорогих каталізаторів або тривалих біологічних перетворень, необхідні джерела вуглецю. Це технологічно складний, дорогий і енерговитратний процес, але існування інфраструктури транспортування природного газу і можливість утилізації CO і CO₂ (як джерел вуглецю) робить ідею цікавою.

Застосування водню для виробництва тепла і електроенергії

Потреби в теплі для центральних і північних країн Європи змінюються цілодобово і сезонно, що вимагає гнучкого графіка поставок і можливості швидко збільшити подачу тепла при різкому падінні зовнішньої температури. Тобто сезонне регулювання і пікове регулювання поставок тепла більш складне, ніж регулювання виробництва і розподілення електроенергії. Це призвело до того, що багато країн взяли курс на генерацію тепла з природного газу. Низьковуглецеві палива не створюють конкуренцію викопному паливу за ціною, та їх використання може спричинити ризик не покриття пікових потреб як по теплу, так і по електроенергії.

Сучасні теплоізоляційні та енергозберігаючі технології, застосування теплових насосів і акумуляторів, перехід на електричне опалення (теплиці), подальше поліпшення перетворення хімічної енергії палива в теплову лише частково вирішують проблему декарбонізації енергетичної галузі та мають межу можливостей. Заміна природного газу на інше газоподібне паливо може значно зменшити викиди парникових газів. До таких альтернативних газів відносять біометан і водень, а також їх суміші та добавки до традиційних палив.

З огляду на вищезгадане зазначимо, що нарощування виробництва водню і подальше його впровадження в енергетиці забезпечать такі технології виробництва водню: парова конверсія з природного газу, біометану або з їх сумішей; електроліз із залученням електроенергії АЕС, газових ТЕС або від відновлювальних джерел.

В енергетиці для генерації тепла і електроенергії відомо два способи використання водню – це безпосереднє спалювання водневих сумішей в топках чи камерах згорання, або застосування водню як палива у ПЕ. Поширення ПЕ, як технології для процесів декарбонізації, почали реалізовуватися в розвинених країнах 5 – 10 років тому.

Існуючі газові котли для парових турбін можуть працювати на водневих сумішах при певній модернізації системи управління подачею водневих сумішей та заміні газового обладнання, в першу чергу, форсунок-горілок. Заміна газового обладнання пов'язана з особливостями зберігання водню і дуже високою швидкістю поширення полум'я при згоранні. Для індивідуального опалення будівель і офісів існують відносно малопотужні каталітичні котли, де досягається «регульоване» згорання водню з мінімально можливою кількістю оксидів азоту [13]. Але такі котли потребують водень високої чистоти.

В енергетичній галузі для скорочення використання природного газу і дизельного палива розробляються газові турбіни для роботи на водні та водневих сумішах. Проблеми при модернізації газових когенераційних установок залишаються такі ж як і при зовнішньому підведенні теплоти у котлах – відсутність інфраструктури з доставки та зберігання водню, висока швидкість водневого полум'я і відповідно розробка спеціальних камер згорання та газових форсунок, необхідність зменшення викидів оксидів азоту.

При використанні ПЕ можлива також комбінована генерація тепла та електроенергії з відносно високим ступенем ефективності.

За кордоном впровадження ПЕ успішно здійснюється на тепло-електричних станціях з централізованою (ТЕЦ) подачею гарячого носія для опалення будівель на відстань до 30 км. Це гібридні технології, які поєднують традиційні когенераційні установки на базі двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ) або із зовнішнім підведенням теплоти (парові турбіни, двигуни Стірлінга) з ПЕ. Перевага такої гібридної технології в можливості утилізації викидів CO і CO₂. В Україні подібні впровадження відсутні, але розрахункові дослідження виконано і описано в роботі [2].

Незважаючи на високу вартість ПЕ знаходять застосування в індивідуальних домогосподарствах у якості мікро-ТЕЦ. Для таких ПЕ застосовують твердо оксидні (керамічні) електроліти або твердо полімерні мембранного типу.

В комерційному і промисловому секторі США, Японії, Південної Кореї використовують ПЕ з більш дешевими каталізаторами та електролітами на основі фосфорних кислот або розплавлених карбонатів. Останні електроліти працюють за найвищих температур і відповідно такі ПЕ найменше довговічні, але вони невимогливі до палива. Зазначимо, що промислові ПЕ на розплавлених карбонатах використовують у якості палива природний газ або біометан.

За даними роботи [7] складена табл. 4, де наведено показники ефективності водневих ПЕ з твердо оксидним (керамічним) електролітом (SOFC за англійською аббревіатурою) та з твердо полімерним мембранного типу (PEMFC за англійською аббревіатурою).

Таблиця 4. Показники ефективності ПЕ з різними електролітами

Показники	Твердо оксидний ПЕ (SOFC)	Твердо полімерний ПЕ (PEMFC)
Електрична потужність, кВт	0,75 – 250	0,75 – 2
Електричний ККД, %	45 – 60	35 – 39
Теплова потужність, кВт	0,75 – 250	0,75 – 2
Тепловий ККД, %	30 – 45	55
Ресурс, роки	3 – 10	10

При генерації електроенергії ПЕ розміщують найближче до споживача, чим зменшують втрати енергії від передачі та розподілення. ПЕ мають мінімальний час перехідного режиму за зміни зовнішнього навантаження. Вважається, що незалежно від величини зовнішнього навантаження електричний ККД в ПЕ незмінний.

Застосовувати ПЕ у якості джерела суто електричного струму дуже дорого, але деякі міжнародні корпорації роблять так і презентують свій вклад у світові процеси екологізації та боротьби з глобаль-

ним потеплінням. Прикладом є використання з 2008 р. компанією Google електричних модулів на основі твердо оксидних ПЕ, які виробляє фірма Bloom Energy[14]. Модуль має електричну потужність 200 кВт, з відповідним ККД у 50 – 60 %. Паливом є природний газ або біометан.

Зазначимо, що відомості про прибутки від продажу стаціонарних модулів на базі ПЕ відсутні.

Використання водню для автомобілів і автобусів

Міжнародні експерти з глобальної декарбоні-

зації вважають, що в 2050 р. майже половина енергетичних витрат у світовому сегменті автотранспорту буде припадати на приватні легкові автомобілі [4]. Тому легкові автомобілі попали у перші рядки програм декарбонізації. Для гальмування росту парку індивідуальних легкових автомобілів розробляються заходи з розвитку громадського транспорту і відповідно міські автобуси і комунальні таксі займають наступний рядок у програмах декарбонізації.

Водневе паливо є одним із трьох напрямів у програмах декарбонізації транспортної галузі. Потужну конкуренцію водню складають два інших напрями. Перший – це застосування біопалив різних поколінь. Другий – це електромобілі та гібридні автомобілі, які використовують і ДВЗ, і акумуляторні батареї. Електромобілі кількісно випередили впровадження водневих технологій через більшу доступність до зарядних станцій та менші витрати на створення таких станцій.

Традиційні поршневі ДВЗ можна модернізувати для роботи на суто водневому паливі, але це потребує застосування нових матеріалів через високу питому енергоємність водню. Однак, така модернізація буде значно дешевшою, ніж використання водню в ПЕ. На шляху спалювання водню в камерах згорання ДВЗ є обмеження на викиди оксидів азоту (NO_x), які закріплені в регламентах Євросоюзу для здобуття кліматично нейтрального статусу щодо парникових газів. Можливий варіант використання суміші водню з природним газом або модернізація двопаливних ДВЗ. Це найбільш реалістичний варіант на поточний час для України. Він дає можливість використовувати існуючу інфраструктуру природного газу, але не вирішує проблему з обмеженнями на викиди NO_x .

Легкові автомобілі на ПЕ найчастіше використовують мембранні елементи з твердо полімерним електролітом (PEMFC). Середня потужність водневих ПЕ для таких транспортних засобів сягає 60 кВт. Лідерами у виробництві (і досвідом експлуатації) легкових автомобілів з водневими ПЕ є Toyota, Hyundai та Honda. В 2020 р. Audi і Mercedes-Benz презентували свої конструкції легкових автомобілів на водневому паливі.

Через відсутність водневих заправок в Україні продаж і експлуатація автомобілів на ПЕ немає сенсу. Крім великих капіталовкладень у водневу інфраструктуру, поширення автомобілів на ПЕ стримується високою ціною автомобіля. Електромобілі в 2 рази дешевші за автомобілі з ПЕ подібної потужності. На ціну ПЕ мембранного типу впливає використання у якості каталізаторів металів платинової групи. Одночасно провідні автомобільні фір-

ми (наприклад, Daimler, Toyota) рекламують програми та їх виконання з скорочення використання платини для традиційних систем нейтралізації ДВЗ, включаючи дизелі.

Загалом у світі в 2020 р. працювало 570 заправних водневих станцій, половина з яких розміщено в Японії та США. За державними програмами мережу заправних станцій розбудовує Великобританія, Франція, Німеччина та Скандинавські країни [15].

На автобусні і вантажні автомобільні перевезення припадає біля чверті енергії, витраченої у транспортній галузі. Зростаючі законодавчі вимоги до мінімізації викидів у атмосферне повітря і державні програми переходу у великих містах на транспорт з нульовими викидами є потужним рушієм до застосування водневих автобусів на ПЕ.

Під час чемпіонату світу з футболу в 2006 р. пасажирів у Берліні возили автобуси на ПЕ [16]. Водень у балонах під тиском 35 МПа був розміщений на даху автобусу. Кількість водню у балоні була 40 кг.

В 2020 р. у Токіо не відбулись Олімпійські та Параолімпійські ігри через пандемію короно вірусу. Незважаючи на це, в січні 2020 р. фірма Toyota представила державній комісії 150 автобусів на водневих ПЕ, було передбачено задіяти для них всю водневу інфраструктуру [17].

Маючи заправні станції, в країнах Скандинавії експлуатуються автобуси на водневих ПЕ. Досвід експлуатації автобусів у цих країнах буде корисним для України, яка має схожі зимові погодні умови. Міністерство енергетики США вважає, що строк служби ПЕ для автобусів повинен становити 25000 годин [18]. Для міжміських і вантажних перевезень цей строк повинен бути у 2 рази більший.

В Україні в 2021 р. на виставці City-Trans&Parking 2021 компанія «Політехносервіс» спільно з Ukrainian Hydrogen&Energy Storage Association презентували проект з майбутнього виробництва в Україні водневого автобуса. Презентація проекту отримала підтримку від асоціації Hydrogen Europe. Представник асоціації Hydrogen Europe зазначив, що Україна за фінансової підтримки може продавати водень у Європу і одночасно розвивати водневі технології у своїй країні.

Висновки

Водневе паливо і водневі технології слід позиціонувати як один із напрямів енергетичного переходу галузей економіки на рейки декарбонізації, що приведе до створення кліматично нейтральних технологій.

В енергетиці водневі технології конкурують не з традиційними способами отримання тепла та електричної енергії, а з біоенергетикою, з тепловими насосами, з технологіями уловлювання та зберігання вуглецю та його оксидів.

В автомобільній галузі водневі технології конкурують з рідкими і газоподібними біопаливами, електромобілями та гібридами з ДВЗ і акумуляторами.

Потенціальні можливості застосування водневих технологій для процесів декарбонізації розкриваються тільки після створення ринку продажу водню та відповідної інфраструктури. На сегмент і ціну застосування водневих технологій впливає спосіб вибраного процесу виробництва, складових інфраструктури, які включають зберігання, транспортування і заправні станції.

Безпечна експлуатація і впровадження водневих технологій в Україні потребує кваліфікованих інженерних кадрів. Підготовку таких спеціалістів для енергетики і транспорту можуть взяти на себе університети за спеціальністю 142 – енергетичне машинобудування.

Список літератури:

1. *Фундаментальні аспекти відновлювально-водневої енергетики і паливно-комірчанних технологій / за загальної ред. Ю.М. Солоніна. – К.: «КІМ», 2018. – 260с.*
2. Бганцев В.М. Газові двигуни внутрішнього згорання в системах підвищення ефективності паливних елементів об'єктів великої енергетики / В.М. Бганцев, А.М. Левтеров // *Двигуни внутрішнього згорання. – 2022. – №2. – С. 20-24. DOI: 10.20998/0419-8719.2022.2.03.*
3. *World Resources Institute / CAIT Climate Data Explorer. – March 10, 2015. – Режим доступу: <https://www.wri.org/data/cait-climate-data-explorer>.*
4. *Energy Information Administration / International Energy Outlook. – 2017. – Режим доступу: <http://www.eia.gov/ieo>.*
5. *Government to miss 2020 renewable energy targets / ECC Select Committee. – September 9, 2016. – Режим доступу: <https://www.parliament.uk/external/committees>.*
6. *Global Hydrogen Generation Market By Merchant & Captive Type, Distributed & Centralized Generation, Application & Technology - Trends & Forecasts (2011-2016) / Research and Markets. – December 16, 2011. – Режим доступу: <https://www.businesswire.com/news/home/20111216005337>.*
7. *Fuel Cells – Data, Facts and Figures / за ред. D. Stolten, R. C. Samsun and N. Garland. – Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany. – 2016. – ISBN: 978-3-527-33240-3.*
8. Schmidt O. *Future cost and performance of water electrolysis: An expert elicitation study / O. Schmidt, A. Gambhir, I. Staffell, A. Hawkes, J. Nelson and S. Few // Int. J. Hydrogen Energy. – 2017. – Vol. 42, Issue 52. – pp. 30470–30492. doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.10.045.*
9. Lehner M. *Power-to-Gas: Technology and Business Models / M. Lehner, R. Tichler, H. Steinmüller and M. Koppe. – Springer Briefs in Energy. – January, 2014. – 94p. – ISBN: 978-3-319-03994-7. DOI: 10.1007/978-3-319-03994-7.*
10. Лісовал А.А. Використання біогазу як сировини і моторного палива в енергетиці і на транспорті / А.А. Лісовал //

11. *Двигуни внутрішнього згорання. – 2022. – №2. – С.13-19. DOI: 10.20998/0419-8719.2022.2.02.*
12. Gotz M. *Renewable Power-to-Gas: A technological and economic review / M. Gotz, J. Lefebvre, F. Mors, A. M. Koch, F. Graf, S. Bajohr, R. Reimert and T. Kolb // Renewable Energy. – 2016. – Vol. 85. – pp. 1371–1390. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.066>.*
13. Zhang F. *The survey of key technologies in hydrogen energy storage / F. Zhang, P. C. Zhao, M. Niu and J. Maddy // Int. J. Hydrogen Energy. – 2016. – Vol. 41, Issue 33. – pp. 14535–14552. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.05.293>.*
14. *Desk study on the development of a hydrogen-fired appliance supply chain / [M. Dorrington, M. Lewitt, I. Summerfield, P. Robson and J. Howes]. – Kiwa & E4 Tech, UK. – 2016. – Report 30686. – 86p.*
15. *NASA™ Technology Comes to Earth / Bloom Energy. – 2017. – Режим доступу: <http://www.bloomenergy.com/about/company-history>.*
16. *Germany had the highest increase of hydrogen refuelling stations worldwide in 2017 / Ludwig-Bölkow-Systemtechnik and TÜV SÜD. – 2018. – Режим доступу: <https://www.tuvsud.com/en/press-and-media/2018/february>.*
17. *Urban buses: alternative power-trains for Europe / FCH-JU. – 2012. – 58p. – Режим доступу: <https://www.fuelcellbuses.eu/sites/default/files/documents>.*
18. *Toyota to Start Sales of Fuel Cell Buses under the Toyota Brand from Early 2017 / Toyota. – October 21, 2016. – Режим доступу: <https://global.toyota/en/detail/13965745>.*
19. *Marcinkoski J. Fuel Cell System Cost – 2015 / J. Marcinkoski, J. Spindelov, A. Wilson and D. Papageorgopoulos. – US Department of Energy. – 2016. – Режим доступу: https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/15015_fuel_cell_system_cost_2015.pdf.*

Bibliography (transliterated):

1. Solonin, Y.M. (2018), "Fundamental aspects of renewable hydrogen energy and fuel cell technologies", ["Fundamental'ni aspekty vidnovlyval'no-vodnevoi enerhetyky i palyvno-komirchanykh tekhnolohiy"], Kiev, «KIM», 260p.
2. Bgantsev, V.M., Levterov, A.M. (2022), "Gas engines of internal combustion in systems for increasing the efficiency of fuel elements of large energy facilities", ["Hazovi dvyhny vnutrishn'oho zhorannya v systemakh pidvyshchennya efektyvnosti palyvnykh elementiv obyektiv velykoyi enerhetyky"], Internal combustion engines, Vol. 2, pp. 20-24. DOI: 10.20998/0419-8719.2022.2.03.
3. World Resources Institute, CAIT Climate Data Explorer (2015), available at: <http://cait.wri.org>.
4. Energy Information Administration, International Energy Outlook (2017), available at: <http://www.eia.gov/ieo>.
5. "Government to miss 2020 renewable energy targets", ECC Select Committee (2016), available at: <https://www.parliament.uk/external/committees>.
6. "Global Hydrogen Generation Market By Merchant & Captive Type, Distributed & Centralized Generation, Application & Technology - Trends & Forecasts (2011-2016)", Research and Markets (2011), available at: <https://www.businesswire.com/news/home/20111216005337>.
7. Stolten, D., Samsun, R. C. and Garland, N. (2015), "Fuel Cells – Data, Facts and Figures", Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany, ISBN: 978-3-527-33240-3.
8. Schmidt, O., Gambhir, A., Staffell, I., Hawkes, A., Nelson, J. and Few, S. (2017), Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 42, Issue 52, pp. 30470–30492. doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.10.045.
9. Lehner, M., Tichler, R., Steinmüller, H. and Koppe, M. (2014), "Power-to-Gas: Technology and Business Models", Springer Briefs in Energy, 94p, ISBN: 978-3-319-03994-7. DOI: 10.1007/978-3-319-03994-7.
10. Lisoval, A.A. (2022), "Use of biogas as raw material and motor fuel in energy and transport", ["Vykorystannya biohazu yak syrovyny i motoroho palyva v enerhetytsi i na transporti"], Internal combustion engines, Vol. 2, pp. 13-19. DOI: 10.20998/0419-8719.2022.2.02.
11. Gotz, M., Lefebvre, J., Mors, F., Koch, A. M., Graf, F., Bajohr, S., Reimert, R. and Kolb, T. (2016), "Renewable Power-to-Gas: A technological and economic review", Renewable Energy, Vol. 85, pp. 1371–1390. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.066>.
12. Zhang, F., Zhao, P. C., Niu, M. and

- Maddy, (2016), "The survey of key technologies in hydrogen energy storage", *J. Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 41, pp. 14535–14552. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.05.293>. 13. Dorrington, M., Lewitt, M., Summerfield, I., Robson, P. and Howes, J. (2016), "Desk study on the development of a hydrogen-fired appliance supply chain", *Kiwa & E4 Tech*, UK, Report 30686, 86p. 14. "NASA™ Technology Comes to Earth", *Bloom Energy* (2017), available at: <http://www.bloomenergy.com/about/company-history/>. 15. "Germany had the highest increase of hydrogen refuelling stations worldwide in 2017", *Ludwig-Bölkow-Systemtechnik and TÜV SÜD* (2018), available at: <https://www.tuvsud.com/en/press-and-media/2018/february>. 16. "Urban buses: alternative powertrains for Europe", *FCH-JU* (2012), 58p, available at: <https://www.fuelcellbuses.eu/sites/default/files/documents>. 17. "Toyota to Start Sales of Fuel Cell Buses under the Toyota Brand from Early 2017", *Toyota* (2016), available at: <https://global.toyota/en/detail/13965745>. 18. Marcinkoski, J., Wilson, A. and Papageorgopoulos, D. (2016), "On-Road Fuel Cell Stack Durability", *US Department of Energy*, available at: https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/15015_fuel_cell_system_cost_2015.pdf.

Надійшла до редакції 07.07.2023 р.

Лісовал Анатолій Анатолійович – доктор техн. наук, професор, професор кафедри двигунів і теплотехніки, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail:li-dvz@bigmir.net <https://orcid.org/0000-0001-6168-4010>

BACKGROUND FOR THE USE OF HYDROGEN IN UKRAINE IN THE ENERGY AND AUTOMOTIVE SECTORS

A.A. Lisoval

Based on the global trends, the article substantiates the place of hydrogen and hydrogen technologies in the further decarbonisation of the energy sector and road transport in Ukraine. The variety of methods of production, transportation and storage, and the use of hydrogen of different purity require complex trade-offs between the cost of the technology and the amount of possible emissions of harmful substances into the environment at all related stages of application of these technologies. Hydrogen fuels and hydrogen technologies should be positioned as one of the areas of energy transition of economic sectors to decarbonisation, which will lead to the development of climate-neutral technologies. Traditional reciprocating internal combustion engines (ICE) can be upgraded to run on purely hydrogen fuel, but this requires the use of new materials due to the high specific energy intensity of hydrogen. The combustion of hydrogen in ICE combustion chambers is hindered by nitrogen oxide (NO_x) emission restrictions. A possible option is to use a mixture of hydrogen and natural gas or to upgrade dual-fuel internal combustion engines. This is the most realistic option for Ukraine at this point. In light of the decarbonisation process, the main advantage of fuel cells (FC) is the absence of hydrocarbon combustion and, accordingly, the ability to reduce air pollution with the greenhouse gas CO₂. Existing FC can operate not only on hydrogen but also on natural gas. In the energy sector, hydrogen technologies compete not with traditional methods of generating heat and electricity, but with bioenergy, heat pumps, and technologies for capturing and storing carbon and its oxides. In the automotive sector, hydrogen technologies compete with liquid and gaseous biofuels, electric vehicles and hybrids with internal combustion engines and batteries. The potential application of hydrogen technologies for decarbonisation processes will only be unlocked once a hydrogen market and the relevant infrastructure are in place. The segment and price of hydrogen technologies depend on by the method of production process chosen, as well as the infrastructure components, including storage, transportation and fuelling stations. The safe operation and implementation of hydrogen technologies in Ukraine requires qualified engineering staff. The training of such specialists for the energy and transport sectors can be taken on by universities by universities in the speciality 142 – energy engineering.

Key words: hydrogen; hydrogen technology; fuel cell; internal combustion engine; energy; car; bus.