

Паливо та енергетика

УДК 621.593

DOI: 10.33070/etars.2.2020.01

Карп І.М., акад. НАН України, докт. техн. наук, проф., ORCID 0000-0001-5320-0290
Інститут газу НАН України, Київ
вул. Дегтярівська, 39, 03113 Київ, Україна, e-mail: karpkiev@gmail.com

Водень : Властивості, виробництво та особливості використання

На виробництво «зеленого» водню електролізом води витрачається більше енергії, ніж можна отримати при його використанні. На отримання 1 м³ електролітичного водню витрачається 4–5 кВт·год електроенергії при тому, що у ньому міститься хімічної енергії 3,0 кВт·год. Теплотворна спроможність водню у 3,3 рази менша, ніж метану. Водень розчиняється у металах, спричиняє їх корозію. Транспортування його потребує спеціальних матеріалів для трубопроводів, а також спеціального проектування, компресорів, засобів контролю. Внаслідок широких меж вибуховості, великої швидкості розповсюдження факела його використання пов'язане з ризиками та потребує спеціальних заходів безпеки. Використання водню як палива для приводу маневрових потужностей в енергосистемі України або для заміщення рідких моторних палив потребує для його виробництва кількості енергії, співмірної з обсягами її загального споживання у країні, значних об'ємів води та вирішення проблеми використання надлишку кисню. З урахуванням вартості в Україні електроенергії з відновлювальних джерел економіка виробництва водню з їх використанням виходить за межі розумного. Транспортування водню у стиснутому або зрідженому стані енергетично та економічно витратне. Припустиме транспортування та використання сумішей природного газу з воднем. Рушійною силою водневої енергетики є запобігання антропогенному впливу на зміну клімату, що само по собі є проблематичним. Велику кількість проектів щодо водневої економіки, що розробляються в Європі та у світі, можна пояснити виділенням значних коштів на вирішення цієї проблеми, у яких зацікавлені потужні компанії та науковці — водневі активісти. *Бібл. 16, табл. 1.*

Ключові слова: водень, виробництво, транспортування, зберігання, економічність, проблематичність.

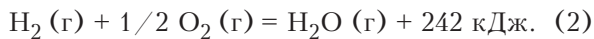
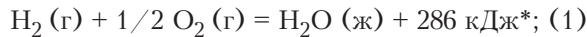
Властивості водню. Водень як хімічний елемент був відкритий у 1766 р. англійським вченим Генрі Кавендішем. У 1783 р. французький хімік А.Лавуазьє дав речовині назву *hydrogene* (від грецького «той, хто народжує воду»). У 1800 р. було винайдено процес отримання водню з води електролізом. У наступних роках бу-

ли винайдені паливні елементи — електрохімічні прилади прямого перетворення водню на електроенергію — та технологія виробництва водню паровою конверсією вуглеводнів.

Водень — хімічний елемент з атомним номером 1, «найпростіший представник усіх хімічних елементів взагалі» (Вікіпедія). Два ато-

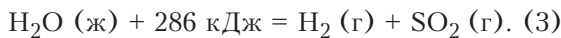
ми хімічного елемента водню утворюють речовину «водень» — найлегший газ без запаху, кольору та смаку. Він погано розчиняється у воді та інших розчинниках та добре у багатьох металах: нікелі, платині, паладії. На відміну від інших газів (аргону, оксиду вуглецю) розчинність водню у розплаві заліза зростає з температурою. При недостатньо інтенсивному «кипінні» сталі значна кількість водню залишається у металі. При застиганні металу більша частка водню з нього виділяється, утворюючи волосовини та тріщини у відливках. Для запобігання цьому виконується продувка сталі аргоном у ковші. Частина водню залишається у сталі. Завдяки надзвичайно малим розмірам молекула водню дифундує у кристалічну решітку металу. Дифузія водню у метал призводить до явища так званої водневої корозії. Механізм корозії остаточно не визначений. Існує гіпотеза, що водень взаємодіє з розчиненим у металі вуглецем з утворенням метану, який по мірі розвитку процесу та підвищення тиску розриває міжкристалічні зв'язки, що призводить до руйнації металу. З підвищенням температури до 200 °С та вище процес корозії суттєво прискорюється.

Горіння водню протікає за реакціями:



(*Теплові ефекти віднесені на 1 г-моль водню.) Реакція (1) передбачає конденсацію водяної пари при охолодженні продуктів згорання; тепловий ефект реакції відповідає вищій теплоті згорання. Тепловий ефект реакції (2) є нижчою теплотою згорання, що відповідає більшості практичного застосування водню як палива, наприклад, у двигунах внутрішнього згорання.

Реакція (3) відображає процес електролізу — розкладання води електричним током:



У даному випадку доцільно виражати витрати енергії на електроліз у кВт-год/м³ водню: 286 кДж/(г-моль) = 3,55 кВт-год/м³. Згідно з першим началом термодинаміки, «обійти» цю величину неможливо. У таблиці наведені теплофізичні характеристики водню та природного газу.

Нижча теплотворна спроможність водню становить 3,0 кВт-год, вища — 3,55 кВт-год. Енергетична цінність водню по нижчій теплоті згорання у 3,3 рази менша, ніж метану. Це треба враховувати у розрахунках трубопроводів та

Теплофізичні характеристики водню та природного газу

Показник	H ₂	CH ₄
Нижча теплота згорання Q _н , кДж/м ³ (ккал/м ³)	10800 (2580)	35739 (8550)
Вища теплота згорання Q _в , кДж/м ³ (ккал/м ³)	12767 (3054)	39500 (9450)
Q _в /Q _н , %	118	111
Температура запалювання, °С	510	645
Межі запалювання з повітрям, % у суміші	3,3–81,5	5–15
Калориметрична температура горіння, °С	2380	2211
Нормальна швидкість розповсюдження полум'я, м/с*	1,6	0,28

* В інших джерелах наводиться для H₂ — 2,7–4,8 м/с, для CH₄ — 0,37 м/с.

пальникових пристроїв у разі заміщення природного газу воднем. У процесі застосування водню у котельних установках та на транспорті необхідно дотримуватися особливих вимог техніки безпеки через його високу запалювальну здатність та велику швидкість розповсюдження полум'я. Треба зважати на високу проникаючу здатність водню, через що звичайні матеріали непридатні для його транспортування та зберігання внаслідок водневої корозії.

Існуючі газові мережі непридатні для транспортування чистого водню. Водневі трубопроводи потребують інших матеріалів, іншої технології зварювання, компресорів, сенсорів, засобів безпеки. Збільшується можливість витікання його через нещільності у з'єднаннях та арматурі внаслідок великого тиску. У світі на 2016 р. нараховувалося усього 4,5 тис. км водневих трубопроводів, з них у США — 2,6 тис. км, у решті країн — по декілька сотень кілометрів [1].

Токсичні речовини при спалюванні водню. У багатьох публікаціях щодо використання водню в енергетичних установках стверджується, що у продуктах його горіння є тільки вода. Це не відповідає дійсності. Спеціалістам з питань горіння добре відомо про утворення шкідливих речовин при спалюванні різних палив при високих температурах, зокрема найбільш шкідливих речовин — оксидів азоту. Концентрація NO_x залежить від складу палива та пропорційна температурі горіння. У роботі [2] наводяться дані розрахунку вмісту NO_x у продуктах згорання водню при теоретичній температурі горіння 2380 К в умовах термохімічної рівноваги. Він становить 0,0005 мольних долей, або у перерахунку на загальноприйняті величини — 547 мг/м³ (273 млн⁻¹). Для порівняння: у продуктах горіння метану при температурі 2222 К концентрація NO_x, наведена у роботі, дорівнює 0,002 мольних долей (або

2466 мг/м³, або 1230 млн⁻¹), тобто у 4,5 рази більша. Створюється враження про екологічну перевагу використання водню. Але, якщо прийняти до уваги меншу у 3,3 рази теплотворну здатність водню відносно природного газу, то при однаковому енергетичному навантаженні теплового агрегату сумарні викиди оксиду азоту виявляються близькими. Значно більші концентрації оксидів азоту у продуктах спалювання водневовмісних палив наведені у роботі [3]. Для коксового газу з вмістом Н₂ 60 % рівноважна концентрація NO_x у сухих продуктах горіння при T = 2286 К становить 3089 млн⁻¹, а для синтез-газу з вмістом Н₂ 75 % при T = 2367 К вона становить 4309 млн⁻¹. Дані віднесені до умов корисно використаної енергії. Наведені дані слід розглядати як індикативні, оскільки у реальних процесах ані теоретична температура горіння, ані рівноважні концентрації компонентів продуктів горіння не досягаються. Реальні дані можуть відрізнятись від теоретично розрахованих на порядок. Висновок з вищесказаного полягає у тому, що при спалюванні водню, як і при спалюванні метану та інших газоподібних палив, також утворюються токсичні речовини, хоча й у менших концентраціях.

Виробництво водню. До недавнього часу вважалося, що водню у вільному стані в природі не існує. Але нещодавно у Республіці Малі в Африці було відкрито родовище природного водню. Пробурено 22 свердловини, з яких отримано водень чистотою 98 %. Є повідомлення, що подібні геологічні структури знаходяться також в Україні у Ровенській обл., але це ствердження має бути підтвержене бурінням свердловин. Тому можна стверджувати, що на цей час водень — це штучне паливо, оскільки використання вільного водню розпочнеться у далекому майбутньому та на обмежених територіях.

На виробництво водню електролізом потрібно більше енергії, ніж її можна отримати при його використанні. Таким чином, виробництво електричної або теплової енергії з водню є енергетично збитковим. Сировиною для його виробництва можуть бути метан, інші вуглеводневі гази, нафта, вугілля, біопалива, тверді побутові відходи, водорості. Існує багато способів виробництва водню, але промислове значення мають парова каталітична конверсія вуглецевмісних речовин та електроліз води. Конверсія (риформінг) — це ендотермічна реакція вуглецю з водяною парою, в результаті якої отримують синтез-газ — суміш оксиду вуглецю та водню. Співвідношення між оксидом вуглецю та воднем у синтез-газі залежить від

вихідної сировини. Оксид вуглецю в результаті екзотермічної реакції з водяною парою перетворюється на водень та діоксид вуглецю, які скидають в атмосферу. У синтез-газі присутні також домішки у вигляді метану, що не прореагував, та інших продуктів. Реакція конверсії використовується у високотемпературних твердотільних паливних елементах (ПЕ). Коефіцієнт корисної дії процесу конверсії оцінюється у 75 %. Собівартість виробництва водню конверсією оцінюється у 2–5 дол./кг Н₂, що у перерахунку становить 0,18–0,45 дол./м³ Н₂. Конверсією вуглеводнів, нафти та вугілля, за різними оцінками, отримують 95–99 % водню, а решту (від 1 до 5 %) електролізом. Вартість виробництва водню конверсією у 2–5 разів менша, ніж електролізом. Витрата електричної енергії на виробництво 1 м³ водню електролізом у середньому становить 5 кВт·год, у найкращих сучасних електролізерах — 4 кВт·год, тобто собівартість електролізного водню становитиме 0,9–2,25 дол./м³. У роботі [4] ККД виробництва водню електролізом по відношенню до первинного палива оцінюється у 23 %.

Електроліз 1 т води продукує 111,5 кг водню (1237 м³ за нормальних умов) та 885 кг кисню (618 м³). Промислове використання кисню обмежене. Він використовується у металургії, медицині, а також для виробництва азотної кислоти з аміаку. За сучасних обсягів виробництва водню має місце приблизний баланс у споживанні кисню, але у разі значного збільшення виробництва водню кисень втратить комерційну цінність і його треба буде просто скидати в атмосферу. Пошук ринків збуту для кисню підвищить економічність виробництва «зеленого» водню.

Водень, отриманий конверсією метану (SMR — Steam Methane Reforming), називають «сірим», оскільки його виробництво пов'язане з емісією в атмосферу діоксиду вуглецю — 10 кг СО₂/кг Н₂. Якщо конверсія супроводжується вилученням та захороненням СО₂ (CCS — Carbon Capture and Storage), то отриманий у такому процесі водень називають «блакитним». Додавання процесу CCS до технології SMR збільшує капіталовкладення у виробництво водню на 87 %, а експлуатаційні витрати на 33%. При цьому вартість водню становитиме до 1,8 євро/кг, а ціна утилізації СО₂ — майже 70 євро/т СО₂ [11]. Повідомляється про три проекти виробництва «блакитного» водню у США, Канаді та Японії та наміри щодо реалізації аналогічного проекту для Австралії. Так, в інформації журналу PEI (Power Engineering International) від 23.10.2019 р. йдеться

про контракт компанії АВВ щодо автоматизації, електрифікації та контрольно-вимірювальних приладів для австралійського пілотного проекту HESC (Hydrogen Energy Supply Chain). Метою проекту є випробування виробництва водню газифікацією бурого вугілля, зрідження газоподібного водню та завантаження його на перший у світі спеціалізований транспорт для транспортування в межах Азійсько-Тихоокеанського регіону. Уряд Австралії розглядає цей проект як «вирішальний крок» на шляху перетворення Австралії на світового лідера в галузі виробництва водню.

Водень, отриманий електролізом з використанням електроенергії з відновлюваних джерел, називають «зеленим». Основна частина водневих проектів концентрується навколо виробництва «зеленого» водню, до якого виявляє інтерес і атомна енергетична галузь. Повідомляється про початок будівництва у 2019 р. в Німеччині найбільшої у світі установки з виробництва 1300 т водню (14,4 млн м³) щорічно методом електролізу. Такий об'єм газу може забезпечити електрогенеруючу установку потужністю 2 МВт, що у масштабі енергосистеми є незначною величиною. Така продуктивність установки відповідає потребам транспортної енергетики, але слід зауважити, що технології зберігання водню на борту транспортного засобу на цей час недосконалі та неефективні. Потужну станцію з виробництва водню за методом електролізу введено у дію в Японії. Вартість станції 189 млн дол., для виробництва водню використовується електроенергія від сонячної установки потужністю 20 МВт. Передбачається використання водню для заправки 560 автомобілів на паливних елементах щоденно та виробництва електроенергії для забезпечення потреб учасників Олімпійських ігор [5].

Використання водню. У даний час загальне світове виробництво водню оцінюється близько 75 млн т, з яких третина використовується у нафтохімічній промисловості, дві третини — для виробництва мінеральних добрив. Незначна кількість водню використовується у машинобудуванні для охолодження підшипників енергетичних машин та як захисна атмосфера.

Протягом останніх двох десятиріч значна увага приділяється проблемі енергетичного використання водню як палива для енергетичних установок та акумуляторів енергії. Кількість публікацій на цю тему не піддається визначенню. Деякі автори навіть вважають, що на основі широкого використання водню настає нова ера не тільки в енергетиці, а й у економіці в цілому. Цю еру економіки вони називають «вод-

невою економікою», вважаючи, що вона є «об'язком майбутнього для глобальної економіки, у якій водень стає новим глобальним енергоносієм та починає відігравати роль, порівняну з тією, яку в даний час відіграють вугілля, нафта або газ, та набагато важливішу від нинішньої ролі гідроенергетики, атомної та біоенергетики разом узятих» [1]. Стверджується, що воднева економіка вже зараз починає формуватися в окремих регіонах завдяки економічній конкурентоспроможності по відношенню до вуглеводневих палив, які дорожчають, а також через взяті на себе зобов'язання компаній, регіонів та навіть держав у боротьбі з глобальними змінами клімату. Як приклад наводиться Японія, яка нібито поставила за мету будівництво «суспільства, основаного на водні» [6] за рахунок розвитку водневого технологічного ланцюжка та проєктів експорту водню з Австралії, Норвегії та Близького Сходу, а також використання водню у мільйонах домогосподарств.

Використання 100 % «зеленого» водню як палива у системах індивідуального опалення «у мільйонах домогосподарств» викликає сумніви через економічні причини та ризики, що витікають з його властивостей. У перспективі можливе використання у системах опалення сумішей природного газу та водню. У подальшій перспективі можна очікувати використання у системах індивідуального опалення високотемпературних паливних елементів з воднем як робочою речовиною, де первинним енергоносієм буде природний газ або пропан-бутан. Випробування таких систем індивідуального опалення в Європі вже почалося.

Ефективне та безпечне функціонування Об'єднаної енергетичної системи України вимагає наявності маневрених потужностей для регулювання добових та сезонних навантажень, а також внаслідок збільшення в енергосистемі частки відновлювальних джерел енергії (ВДЕ) [7]. Як одне з первинних джерел енергії для маневрених потужностей розглядається водень. У першу чергу йдеться про «зелений» водень, який можливо продукувати як централізовано, так і на місці його споживання з використанням електричної енергії з відновлюваних джерел або АЕС.

Національна енергетична компанія «Укренерго», яка керує Об'єднаною енергетичною системою України, оцінює потребу у маневрених потужностях у 2,5 ГВт [8]. Технологічно ці потужності мають базуватися на використанні газових двигунів внутрішнього згорання, які мають достатньо високий ККД, а головне, можуть бути підключені до енергосистеми за декілька хвилин.

Для забезпечення такої потужності протягом року (прийнято термін 8000 год) за рахунок використання водню з ККД 40 % його потрібно 16,8 млрд м³. Беручи до уваги, що завантаження маневрених потужностей складає близько третини вказаного часу, неважко підрахувати, що на виробництво 5,6 млрд м³ потрібно витратити близько 25 млрд кВт·год. Виробляти енергію на основі традиційних джерел задля того, щоб використати її на електроліз, суперечить цілям водневої енергетики, тому такий сценарій слід вважати нездійсненним.

Китайська інформаційна компанія FuelCellWorks сповіщає про амбітні наміри виробництва та широкого використання водню у провінції Хебей («China's Hebei Approves 1,2 bln \$. Hydrogen Production and Consumption Projects», FuelCellWorks, April 3, 2020). Передбачається виконати 43 різних проекти з виробництва водню, будівництва автозаправних водневих станцій, виробництва паливних елементів. Заплановано довести виробництво водню у 2021 р. до 21 тис. т, у 2050 р. до 50 тис. т. Разом з італійською компанією Tenova Group планується вилучати 3 т водню з коксового газу для використання його у виробництві 1,2 млн т сталі та виробляти 300 т зрідженого метану для транспортних потреб.

Один з перших проектів, спрямованих на вивчення можливості використання сумішей природного газу з воднем у регіональній газовій мережі для задоволення комунальних потреб, почав виконуватися у Великобританії [9].

Проект HyDeploy — це перший практичний проект Великобританії, який продемонстрував, що водень можна безпечно домішувати у систему розподілу природного газу, не вимагаючи змін у приладах та пов'язаних з цим порушень. Проект фінансується регулятором ринку газу та електроенергії Великобританії Ofgem у рамках конкурсу з питань інновацій у мережі та є співпрацею між газорозподільними підприємствами — спонсорами проекту: Cadent Gas, Northern Gas Networks (NGN), Progressive Energy Ltd., Університетом Кіле (Keele University), Лабораторією охорони здоров'я та безпеки (Health & Safety Laboratory (HSL)), компанією ITM Power Cadent Gas та Northern Gas Networks. Університет Кіле, найбільший університет у Великобританії, є приймаючою стороною, яка забезпечує газорозподільну мережу, що отримує водневу суміш. Лабораторія охорони здоров'я та безпеки забезпечує наукове лабораторне обладнання та експериментальну експертизу. ITM Power забезпечує електролізер,

що виробляє водень. Progressive Energy Ltd. — розробник та менеджер (керівник) проекту.

Проектом HyDeploy заплановано домішувати до 20 % водню до звичайної подачі газу в частині приватної газової мережі Університету Кіле, обслуговуючи 17 факультетських будівель та 101 будинок кампусу. За проектом, клієнти продовжуватимуть використовувати газ, як і дотепер, без будь-яких змін для газових приладів або трубопроводів. Кампус Кіле розглядався як ідеальний тестовий майданчик, оскільки Університет Кіле має міжнародну репутацію досконалого дослідника, відокремлену власну газову мережу, незалежну від загальної газової мережі Великобританії, населення кампусу за величиною порівняне з невеликим містечком.

Проект розрахований на 4 роки та складається з 3-х фаз. Перша фаза — це 18-місячна наукова програма, призначена створити необхідну доказову базу для демонстрації того, що водень можна безпечно домішувати у газову мережу Університету Кіле для цілей випробувального періоду. Програма складається з трьох основних елементів: 1) лабораторна робота; 2) тестування мережевих приладів; 3) аналіз ризиків. Все це мало отримати аргументи для дозволу введення у мережу водню до 20 % (мол.). Детально результати виконання робіт за 1-ю фазою можна знайти за посиланням [9]. В Україні на закритих ділянках розподільчої газової мережі Регіональної газової компанії почалося тестування транспортування сумішей природного газу з воднем (https://biz.censor.net.ua/resonance/3179740/zachem_v_gazovyh_setyah_ukrainy_nachinayut_tes_tirovat_vodorod).

Найбільшу частку «водневих» проектів складають проекти, що пов'язані з використанням водню на транспортних засобах. Повідомляється про сотні «водневих» пілотних проектів у Німеччині, Великобританії, США, Південній Кореї. У Швейцарії почали курсувати 18-тонні вантажівки Hyundai H₂ Xcient, що працюють на водні [10]. Автомобілі оснащені паливними елементами потужністю 190 кВт та мають сім резервуарів для водню загальною ємністю 35 кг, що забезпечує пробіг у 400 км, як у автомобілів з електричними батареями. Водень виробляється в електролізерах фірми Linde потужністю 2 МВт, розрахованих на постачання водню 40–50-ти автомобілям. До 2025 р. планується збільшити потужності з виробництва водню до 70–100 МВт.

Інформаційне джерело «Цензор.Нет» наводить ряд прикладів використання водню на транспортних засобах [11]. Перші у світі потяги на водневих паливних елементах почали курсувати у Німеччині в землі Нижня Сак-

сонія. З вересня 2018 р. по липень 2019 р. вони пройшли 100 тис. км. Поїзди мають по два електродвигуни, ємність з воднем та паливний елемент встановлені на даху. Максимальна швидкість — 140 км/год, дальність поїздки на одній заправці — 800–1000 км, час заправки — 15 хв. До кінця 2021 р. передбачається поставити на колію ще 14 водневих поїздів загальною вартістю 81 млн євро. Планується впровадити водневі потяги і в інших землях країни. Німеччина планує стати світовим лідером у галузі використання транспорту на водні [11].

В Японії у 2013 р. почався випуск гібридних автомобілів з паливними елементами Toyota Mirai, які почали продаватися у США та Європі у 2015 р. Балони з воднем розташовані під днищем автомобіля. Паливні елементи охолоджуються повітрям. Дальність пробігу — до 650 км; система оснащена автоматичним відключенням вихідного клапана резервуара з воднем для запобігання ризику попадання водню у механізми поза салоном. Авто має спеціальний каркас, який розподіляє ударну силу навколо салону та паливних елементів на випадок аварії. Усі деталі, пов'язані з воднем, розташовані за межами кабіни, щоб запобігти ризику загоряння в салоні.

У 2020 р. в Лондоні почнуть курсувати 34 автобуси H₂City Gold на водневих паливних елементах, розроблених португальською компанією Caetano Bus. Паливні елементи встановлені на даху, запас ходу становить 400 км. Потужність паливних елементів виробництва Toyota становить 60 кВт, електричний двигун Siemens має номінальну потужність 180 кВт.

В Японії у 2018 р. розпочато виробництво автобусів на паливних елементах Sora; машини мають 10 балонів, які вміщують 600 л водню, та акумулятор для збереження енергії для електродвигунів. Довжина автобуса 10,5 м, вмістимість 79 чоловік (22 сидячих місця).

З 2001 по 2006 р. в Європі діяла програма Clean Urban Transport for Europe (CUTE) по випробуванню автобусів на водневих паливних елементах. У програмі приймали участь Амстердам, Барселона, Гамбург, Лондон, Мадрид, Люксембург, Порту, Стокгольм, Штутгарт та Рейкьявік. Усі міста отримали по три автобуси Mercedes-Benz Citaro, які разом проїхали понад 2 млн км та перевезли більш 6 млн пасажирів. Після закінчення програми автобуси продовжували курсувати. Канцлер Австрії С. Курц заявив, що планує перетворити Австрію на «водневу державу № 1».

У березні 2020 р. у Нідерландах завершено випробування французької «водневої електрич-

ки» Alstom Coradia Lint. Технологія розроблена для поїздів, які не можуть бути електрифіковані. Вони будуть курсувати в районі міста Гронінген. В Європі 2021 р. має стати «Роком залізниць». Незважаючи на розвинену інфраструктуру, деякі ділянки залізниць ЄС важко або неможливо електрифікувати. Вважається, що для таких ділянок водневий транспорт може стати рішенням проблеми, замінивши старі дизельні електрички.

У статті «Hydrogen vehicles celebrate refueling network with road trip» журналу PEI (Power Engineering International) від 24.10.2019 р. сповіщається про пробіг 13 автомобілів на водні з п'яти європейських країн до Гамбурга з метою демонстрації «водневої мобільності» (hydrogen mobility) та переваг керування водневими автомобілями. Захід проводився за рахунок загальноєвропейського проекту pan-European Hydrogen Mobility Europe (H₂ME) Project. На кошти проекту у Німеччині побудовано вже 32 водневих заправних станції та планується до 2022 р. довести їх кількість до 49. «Водневі» проекти, проекти «Power to Gas» існують і в інших країнах.

При реалізації цього напрямку з технологічної точки зору на перший план виходять проблеми транспортування та зберігання водню. Вартість постачання водню трубопроводами та його розподілу оцінюється у 1 дол./кг, тоді як вартість цих операцій для бензину становить 0,19 дол. за галон (2,6 кг) [12].

Як було зазначено вище, транспортування водню існуючими газопроводами не позбавлено ризиків. У зв'язку з цим для транспортування потрібні або спеціально спроектовані газопроводи, або його треба здійснювати у стиснутому або зрідженому стані. Виходячи із співвідношення теплотворних спроможностей природного газу та водню (3,3), для однакового запасу енергії на борту транспортного засобу потрібний тиск водню 64 МПа. Для зберігання водню під тиском 350–700 атм. (35–70 МПа) у теперішній час використовують полегшені композитні балони, виготовлені з вуглецевого волокна, армованого алюмінієвими або полімерними волокнами. Такі високотехнологічні ємності дуже дорогі. Вартість одного балона порівняна з вартістю бюджетного автомобіля. Навіть при 700 атм. водень містить енергії на одиницю об'єму у 4,6 разів менше, ніж бензин, тому розмір водневого балону має бути у стільки ж разів більшим. Розміщення такої ємності на автомобілі незручне, небезпечне та спричиняє труднощі. Крім того, близько 10–15 % енергії водню витрачається на компресію. Щодо транспортування водню до

споживача у стиснутому стані в умовах централізованого його виробництва, то один трубчастий трак вагою 40 т може нести всього 320 кг водню, стиснутого до 20 МПа, що становить менш 1 % його власної ваги. По суті перевезення водню у стиснутому стані є перевезенням тари. Для порівняння: такий трак може нести 26 т бензину, енергетична ємність якого у 20 разів більша, ніж водню [12]. Транспортування дорогами загального призначення такого легко запалювального та вибухового газу само по собі небезпечне.

В Ulster University у Північній Ірландії вивчалися різні аспекти безпечного використання водню у транспортних засобах. Відзначалося, що механічна енергія при розриві балону водню ємністю 171 л, стиснутого до 350 бар, на автомобілі Honda Clarity еквівалентна вибуху 3 кг тротилу. При розриві балона ємністю 88 л з тиском водню 318 бар внаслідок пожежі утворювалася вогняна куля діаметром 28 м, а машину відкидало на 22 м. При випадковому загорянні автомобіля, наприклад, у випадку ДТП процес горіння протікає настільки швидко, що шанси на спасіння у пасажирів практично відсутні. При однаковій вірогідності пожежі ризики для автомобілів на водні вищі, ніж у автомобілів, що працюють на викопних паливах [13]. Зберігання та транспортування водню у зрідженому стані дуже витратне з енергетичної та економічної точки зору. Температура зрідження водню 20 К ($-253\text{ }^{\circ}\text{C}$). На цей процес витрачається до 40 % енергії, що в ньому міститься. Рідкий водень має високий вміст енергії — 120 МДж/кг (33,3 кВт·год/кг), порівняно з бензином — 44,4 МДж/кг (12,4 кВт·год/кг). Ємності для транспортування рідкого водню мають подвійний корпус, вакуумну теплоізоляцію та мають високу вартість. Дані про втрати водню внаслідок випаровування при його зберіганні у рідкому стані відсутні. До цього часу транспортування водню у рідкому стані використовувалося у виключних випадках, як, наприклад, у Космічному центрі НАСА у Флориді для супутника.

Автори огляду [12] висловлюють небезпідставні сумніви, що такий метод транспортування знайде широке застосування. Внаслідок складнощів та високовартісних показників транспортування рідкого водню від централізованих джерел виробництва як альтернатива розглядається його децентралізоване виробництво на спеціально облаштованих водневих заправних станціях, що не виключає вимоги встановлення високовартісних ємностей для його зберігання та є вибухонебезпечним.

Згідно даних Держкомстату, витрата моторних палив в Україні у 2018 р. становила, млн т: бензину — 1,8, дизельного пального — 5,36, пропан-бутану — 1,0. Для заміщення рідких моторних палив електролітичним воднем знадобиться 31,4 млрд м³ водню; для його виробництва витрата становитиме 125,7 млрд кВт·год електроенергії, що майже дорівнює сумарному обсягу споживання електроенергії у країні. Щоденна потреба у воді становитиме 70 тис. т.

Автори огляду [12] підрахували, що для заміщення бензину електролітичним воднем в економіці США обсяг його щоденного виробництва має становити 0,34 млн т, для чого потрібно щоденно використовувати 3 млн т води; при цьому буде вироблятися 2,7 млн т кисню. Встановлена потужність електрогенерації має становити 850 ГВт, що більше існуючої сумарної потужності. Такі параметри виходять за межі розумного. Особливо важко уявити можливість виробництва необхідної кількості енергії відновлювальними джерелами.

Основним пристроєм для використання водню на транспортних засобах є паливні елементи. Отриманий електролізом водень для паливних елементів може зберігатися на борту транспортного засобу у стиснутому або зрідженому стані. Проблематичність та недоліки такої технології розглянуті вище. Для уникнення проблем, пов'язаних з подібним зберіганням водню, його можна виробляти безпосередньо на транспортному засобі конверсією (риформінг) метану або вуглеводнів, наприклад, метанолу. В 1 л метанолу міститься більше водню, ніж в 1 л його у зрідженому стані при кімнатній температурі — 98,8 г/л, та відповідно 71 г/л у рідкому водні при температурі $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$. Викидними продуктами риформінгу є діоксид вуглецю та вода, тобто основна мета використання водню як моторного палива — запобігання викидам в атмосферу вуглецю — за такої технології не досягається. Економічний виграв використання паливних елементів на вуглеводнях у порівнянні з безпосереднім використанням їх як моторного палива, наприклад, зрідженого метану сумнівний. Так, ККД процесу риформінгу становить 75 %, досягнутий на сьогодні ККД паливного елемента — 56,6 %, тобто сумарний ККД становить 42,4 %. Необхідно взяти до уваги, що паливні елементи виробляють електричну енергію постійного струму та низької напруги, для перетворення якої на перемінний струм потрібної напруги необхідно витратити 10 % від виробленої кількості, що зменшує загальний ККД до 38 %. Мають місце

додаткові втрати ефективності пристрою при проскоку монооксиду вуглецю між електродами. Для порівняння: газові двигуни фінської компанії «Вяртсила» мають ККД 45–48 % у межах навантажень від 10 до 100 %. Досягнута потужність двигунів становить 25 МВт.

Рушійною силою водневої енергетики та, більше, водневої економіки є запобігання змінам клімату, які пов'язують з глобальним потеплінням внаслідок викидів в атмосферу діоксиду вуглецю у продуктах спалювання викопних палив. Цю точку зору поділяє певна частина вчених, але інша (на жаль, менша) частина, до якої належить автор цієї статті, дотримується іншої думки [14]. Зміна клімату не заперечується, але причина цього полягає не в екрануванні випромінювання Землі діоксидом вуглецю, а пояснюється явищами планетарного масштабу. До них належать прецесія, тобто періодичне відхилення земної вісі від умовного центрального положення, періодична зміна активності Сонця та непередбачувана часта зміна напрямку циркуляції повітряних мас від переважно широтного з заходу на схід до меридіонального. Кут відхилення Землі від умовного центру становить більше 23 град. широти, що відповідає по глобусу відстані від Швеції до Кіпру. Час проходження нахилу близько 13 тис. років. У межах цього циклу можна говорити про 200-річний період коливання сонячної активності. Внаслідок зміни клімату та глобального потепління погодні катаклізми спостерігаються по всій земній кулі. Саме через такі явища серед кліматологів розповсюдилася назва сучасного стану клімату як турбулентного. Пророблення вченими значної кількості даних про роль різ-них атмосферних газів у планетарному парниковому ефекті привело до таких цифр: пари води — 80 %, малі газові складові атмосфери: метан, озон, фреони та ін. — 10 %, діоксид вуглецю — 10 %. З цієї кількості діоксиду на долю антропогенного у загальному парниковому ефекті припадає всього 1 %. Багато вчених взагалі вважають теорію глобального потепління найбільшою аферою ХХ ст. [15]. Мабуть, мають рацію ті країни, серед них США, які не ратифікували Паризьку угоду щодо клімату. За показниками повернення інвестицій EROI (Energy Return on Investment) та вартості енергії за життєвий цикл генерації LCOE (Levelized Cost of Energy), відновлювальні джерела, енергію яких передбачається використовувати для виробництва «зеленого» водню, ще не досягли рівня традиційних джерел. Польща, Чехія та багато інших країн орієнтуються на вугілля як основний первинний

ресурс та стримано ставляться до збільшення частки ВДЕ у виробництві електроенергії. В цей час у світі будуються 1000 електростанцій на вугіллі, у тому числі й у розвинених країнах: Китаї, Японії та навіть Німеччині [16].

Висновки

Водень у кількості близько 75 млн т використовується у виробництві мінеральних добрив та у нафтохімічній промисловості. Основною технологією виробництва водню є парова конверсія вуглеводнів або вугілля. При такій технології в атмосферу викидається діоксид вуглецю. Такий водень називають «сірим», та його використання не відповідає вирішенню проблеми безвуглецевої енергетики. Близько 5 % водню («зеленого») виробляється електролізом води. На виробництво 1 м³ водню електролізом витрачається 4–5 кВт·год електричної енергії, енерговміст водню становить 3,0 кВт·год. Теплотворна спроможність водню у 3,3 рази менша за теплотворну спроможність метану. Він має у 5 разів ширші межі запалювання та майже у 10 разів більшу швидкість розповсюдження полум'я у порівнянні з природним газом, характеризується високою проникністю та спричиняє водневу корозію металів. Системи транспортування водню потребують спеціального проектування, використання його як палива — особливих заходів безпеки.

Використання водню як палива для приводу маневрових та стабілізуючих газових потужностей в енергосистемі України або для заміщення рідких моторних палив потребує електрогенеруючих потужностей на його виробництво, співмірних із встановленою потужністю всієї енергосистеми України, значних об'ємів води та вирішення проблеми використання надлишку кисню.

Транспортування водню у стиснутому стані потребує надмірно важких ємностей при незначному вмісті в них водню та значних витрат на стиснення до кілька сот бар. Зрідження водню потребує до 40 % затрат енергії, що у ньому міститься. Вартість криогенної ємності для зрідженого водню співмірна з вартістю деяких автомобілів. Транспортування водню у стиснутому або зрідженому стані дорогами загальною призначення небезпечно.

Вартість електричної енергії з відновлювальних джерел в Україні у кілька разів більша, ніж отримана з традиційних джерел. Тому витрачання електричної енергії з відновлювальних джерел на виробництво «зеленого» водню для подальшого виробництва з нього електро-

енергії у паливних елементах суперечить здоровому глузду.

Припустиме транспортування та використання сумішей природного газу з воднем. Такий проект виконується в Україні.

На проекти з виробництва, транспортування, зберігання та використання водню, що виконуються у світі, витрачаються значні кошти. Проект спрямовані нібито на запобігання антропогенному впливу на зміни клімату, що само по собі є проблематичним. Сучасний стан економіки України не дає можливості вкладатися у водневу економіку доти, поки суспільству не будуть доведені докази перспективності цього напрямку в цілому.

Список літератури

1. Митрова Т., Мельников Ю., Чугунов Д. Водородная экономика — путь к низкоуглеродному развитию. Центр энергетика Московской школы управления Сколково. Июнь 2019. 60 с.
2. Варнатц Ю., Маас У., Диббл Р. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ. М. : Физматлит, 2003. 301 с.
3. Сорока Б.С., Корниенко А.В. Сравнительный энергоэкологический анализ использования альтернативных газовых топлив различного происхождения. *Альтернативная энергетика и экология*. 2012. № 7. С. 105–113.
4. Асланян Г.С., Реутов Б.Ф. Проблематичность становления водородной энергетики. *Теплоэнергетика*. 2006. № 4. С. 66–73.
5. В Японии запустили одну из крупнейших в мире станций по добыче водорода. — <https://biz.censor.net.ua/news/3181083/> 12.03.2020.
6. Challenges for Japan's Energy Transition. Basic Hydrogen Strategy. Agency for Natural Resources and Energy (ANRE), Ministry of Economy, Trade and Industry (METI). October 2018, Japan. pp. 120.
7. Кириленко О.В. Интеллектуальні електричні мережі : елементи та режими. Київ : Ін-т електродинаміки НАН України, 2016. 400 с.
8. Звіт з оцінки відповідності (достатності) генеруючих потужностей. Київ : Укренерго, 2019. 68 с.
9. Tommy I. HyDeploy: The UK's First Hydrogen Blending Deployment Project. *Clean Energy*, 2019, Vol. 3, Iss. 2, pp. 114–125. — <https://doi.org/10.1093/ce/zkz006>.
10. Eckert V., Revill J. Powered by hydrogen, Hyundai's trucks aim to conquer the Swiss Alps. — <https://biz.censor.net.ua/n3187934.09.04.20>.
11. Зачем в мире переходят на водородный транспорт и где он работает. — <https://biz.censor.net.ua/r3184189>.
12. Armaroli N., Balzani V. The Hydrogen Issue (Review). *ChemSusChem*. 2011. № 4. P. 21–36. DOI: 10.1002/cssc.201000182.
13. Shentsov V. Introduction to hydrogen safety e-laboratory and education. Presentation at Naftogas of Ukraine. October 31, 2019. 62 pp. (ulster.ac.uk).
14. Карп И. Кто управляет климатом? *Зеркало недели*. 27.06.2019. № 25.
15. Латынина Ю. Церковь глобального потепления. *Новая газета*. 30.11.2019.
16. Global coal capacity is booming thanks to China and Japan. *PEI*. March 27, 2020. С. 2.

Надійшла до редакції 21.04.20

Карп И.Н., *акад. НАН України, докт. техн. наук, проф., ORCID 0000-0001-5320-0290*
Институт газа НАН Украины, Киев
 ул. Дегтяревская, 39, 03113 Киев, Украина, e-mail: karpkiiev@gmail.com

Водород : Свойства, производство и особенности использования

На производство «зеленого» водорода электролизом воды расходуется больше энергии, чем можно получить при его использовании. На получение 1 м³ электролитического водорода расходуется 4–5 кВт·ч электроэнергии при том, что в нем содержится химической энергии 3,0 кВт·ч. Теплотворная способность водорода в 3,3 раза меньше, чем метана. Водород растворяется в металлах, вызывая их коррозию. Транспортировка его требует специальных материалов для трубопроводов, а также специального проектирования, компрессоров, средств контроля. Вследствие широких границ взрываемости, большой скорости распространения факела его использование связано с рисками и требует специальных мер безопасности. Использование водорода в качестве топлива для привода маневровых мощностей в энергосистеме Украины или для заме-

щения жидких моторных топлив требует для его производства количества энергии, соизмеримого с объемами ее общего потребления в стране, значительных объемов воды и решения проблемы использования избытка кислорода. С учетом стоимости в Украине электроэнергии из возобновляемых источников экономика производства водорода с их использованием выходит за пределы разумного. Транспортировка водорода в сжатом или сжиженном состоянии энергетически и экономически затратна. Допускается транспортировка и использование смесей природного газа с водородом. Движущей силой водородной энергетики является предотвращение антропогенного воздействия на изменение климата, что само по себе проблематично. Большое количество проектов по водородной экономике, разрабатываемых в Европе и в мире, можно объяснить выделением значительных средств на решение этой проблемы, в которых заинтересованы крупные компании и ученые — водородные активисты. *Библ. 16, табл. 1.*

Ключевые слова: водород, производство, транспортировка, хранение, экономичность, проблематичность.

Karp I.M., *Academician of NAS of Ukraine, Doctor of Technical Sciences, Professor, ORCID 0000-0001-5320-0290*

The Gas Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv 39, Degtyarivska Str., 03113 Kyiv, Ukraine, e-mail: yurilobunets@yahoo.co.uk

Hydrogen: Properties, Production and Uses

Electrolysis of water uses more energy to produce «green» hydrogen than can be obtained by using it. On 1 m³ of electrolytic hydrogen consumes from 4 to 5 kW·h of electricity, while it contains chemical energy of 3.0 kW·h. The calorific value of hydrogen is 3.3 times less than methane. Hydrogen dissolves in metals, causing their corrosion. Its transportation requires special materials for pipelines, as well as special design, compressors and control devices. Owing to wide borders of explosiveness, high speed of torch spreading its use is connected with risks and demands special safety measures. The use of hydrogen as a fuel for driving shunting capacities in the energy system of Ukraine or for substitution of liquid motor fuels requires for its production the amount of energy commensurate with the volume of its total consumption in Ukraine, significant amounts of water and solution of the problem of using surplus oxygen. Taking into account the cost of electricity from renewable energy sources in Ukraine, the economy of hydrogen production and its use is beyond reasonable limits. Transportation of hydrogen in compressed or liquefied state is energy and economically expensive. Mixtures of natural gas and hydrogen are allowed to be transported and used. The driver of hydrogen energy is the prevention of anthropogenic impacts on climate change, which in itself is problematic. The large number of projects on the hydrogen economy that have been introduced today in Europe and around the world can be explained by the significant funds allocated to the problem, in which major companies and scientists — hydrogen activists are interested. *Bibl.16, Table 1.*

Keywords: hydrogen, production, transportation, storage, economic viability, problematicness.

References

1. Myrova T., Melnikov Y., Chugunov D. [The hydrogen economy is the way to low-carbon development]. [Center for Energy of the Moscow School of Management Skolkovo]. June 2019. 60 pp. (Rus.).
2. Varnats Y., Maas U., Dybbel R. [Burning. Physical and chemical aspects, modelling, experiments, formation of pollutants]. Moscow : Fizmatlit, 2003. 301 pp.(Rus.)
3. Soroka B.S., Korniienko A.V. [Comparative Energy-Ecological Analysis of Alternative Gas Fuels of

- Various Origin]. *Alternativnaya Enerhetyka i Ekologiya. [Alternative Energy and Ecology]*. 2012. No. 7. pp. 105–113. (Rus.)
4. Aslanyan G.S., Reutov B.V. [Problematicity of hydrogen energy formation]. *Teplenerhetyka. [Thermal power engineering]*. 2006. No. 4. pp. 66–73. (Rus.)
 5. Japan has launched one of the world's largest stations for the production of hydrogen. — <https://biz.censor.net.ua/news/3181083/12.03.2020>. (Rus.)
 6. Challenges for Japan's Energy Transition. Basic Hydrogen Strategy. *Agency for Natural Resources and Energy (ANRE), Ministry of Economy, Trade and Industry (METI)*. Oct. 2018, Japan. 2018. 120 pp.
 7. Kyrylenko O.V. [Intellectual Electrical Networks: Elements and modes]. Kyiv : Institute of Electrical Dynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2016. 400 pp. (Ukr.)
 8. [Report on conformity assessment (adequacy) of generating capacity]. Kyiv : Ukrenergo, 2019. 68 p. (Ukr.).
 9. Tommy I. HyDeploy: The UK's First Hydrogen Blending Deployment Project. *Clean Energy*, 2019, Vol. 3, Iss. 2, pp. 114–125. — <https://doi.org/10.1093/ce/zkz006>.
 10. Eckert V., Revill J. Powered by hydrogen, Hyundai's trucks aim to conquer the Swiss Alps. — <https://biz.censor.net.ua/n3187934.09.04.20>.
 11. [Why is the world switching to hydrogen transport and where it works?] — <https://biz.censor.net.ua/r3184189/> (Rus.)
 12. Armaroli N., Balzani V. The Hydrogen Issue (Review). *ChemSusChem*. 2011. No. 4. pp. 21–36. DOI: 10.1002/cssc.201000182/
 13. Shentsov V. Introduction to hydrogen safety e-laboratory and education. *Presentation at Naftogas of Ukraine*. October 31, 2019. 62 pp. (ulster.ac.uk).
 14. Karp I. [Who controls the climate?]. *Zerkalo nedeli*. 2019. 27 June. No 25. (Rus.)
 15. Latynyna Y. [The Church of Global Warming]. *Novaya gazeta. [New newspaper]*. 30.11.2019. (novayagazeta.ru 019/11/30). (Rus.)
 16. Global coal capacity is booming thanks to China and Japan. *PEI*. March 27, 2020. p. 2.

Received April 21, 2020

УДК 621.57

DOI: 10.33070/etars.2.2020.02

Лобунець Ю.М., докт. техн. наук, ORCID 0000-0002-3593-1687

Інститут газу НАН України, Київ

вул. Десятірівська, 39, 03113 Київ, Україна, e-mail: yurilobunets@yahoo.co.uk

Застосування термоелектричних теплових насосів у системах централізованого теплопостачання

Наведено попередній аналіз можливостей застосування термоелектричних теплових насосів у низькотемпературних централізованих системах теплопостачання (системах 4-го та 5-го покоління). Показано, що завдяки схемним рішенням з використанням термоелектричних теплових насосів можливо забезпечити високу енергетичну ефективність низькотемпературних теплових мереж. Проведено оцінки, що підтверджують доцільність використання термоелектричних теплових насосів, інтегрованих безпосередньо у систему опалення споживачів. *Бібл. 6, рис. 5, табл. 1.*

Ключові слова: централізована система теплопостачання, ЦСТ-4, ЦСТ-5, термоелектричний тепловий насос.

Сучасні програми розвитку систем теплопостачання орієнтовані передусім на створення низькотемпературних централізованих тепломереж з максимальним використанням можливостей спільного виробництва теплової та електричної енергії, так званих мереж 4-го та 5-го покоління [1, 2]. В основі градації теплових мереж за поколіннями лежить температура гріючого теплоносія. Вважається, що мережі першого покоління з паровим опаленням виникли у 1880 р. Наступне покоління мереж (1930-і рр.) базувалося на використанні води під тиском з температурою на

рівні 130 °С. У 1970-х рр. з'явилися мережі 3-го покоління з температурою носія нижче 100 °С, в яких почали застосовувати такі промислові технології виробництва елементів конструкцій, як попередня ізоляція труб. До четвертої генерації відносять мережі з більш низькою температурою (50 °С), що дає можливість значно зменшити капітальні витрати на будівництво теплотрас та втрати енергії під час транспортування, збільшити ресурс мереж та забезпечити можливість широкого використання відновлюваних джерел енергії та теплових відходів [3].