

ВОДЕНЬ В ЕЛЕКТРО- ТА ТРАНСПОРТНІЙ ЕНЕРГЕТИЦІ

І.М.Карп, академік НАН України
Інститут газу НАН України,
вул. Дегтярівська, 39, Київ, 03113, Україна.
E-mail: karpkiev@gmail.com

Показано, що на виробництво водню витрачається більше енергії, ніж можна отримати у разі його використання. Мова йде про виробництво «зеленого» водню. На виробництво 1 м³ водню витрачається від 4 до 5 кВтг електроенергії, при тому, що у ньому міститься хімічної енергії 2,9 кВтг. Теплотворна спроможність водню у 3,3 рази менша, ніж метану. Водень як речовина характеризується високою проникаючою здатністю, його транспортування в звичайних трубах спричинює їхню корозію та окрихчування. Реалізація цього процесу потребує застосування спеціальних матеріалів для трубопроводів, а також спеціального проектування, компресорів, сенсорів. Водень має широкі межі вибуховості, велику швидкість розповсюдження факела, його використання пов'язано з застосуванням спеціальних заходів безпеки. Використання водню як палива для приводу маневрових газових потужностей в енергосистемі 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. Витрати електроенергії для отримання водню для паливних елементів є досить значними і тому перетворення його знову в електроенергію явно недоцільне. Таким чином, з урахуванням вартості електроенергії з відновлюваних джерел та економіки виробництва водню з подальшим його використанням є невигідним. Аналогічний висновок можна зробити стосовно транспортування водню у стисненому або зрідженому стані. Драйвером водневої енергетики є бажання запобігання антропогенному впливу на зміну клімату. Велику кількість проектів із водневої енергетики, які сьогодні запроваджені в Європі та світі, можна пояснити значними коштами, що виділяються на дослідження цієї проблеми. У впровадженні таких проектів зацікавлені потужні компанії та науковці – водневі активісти. Бібл. 9, рис. 1.

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

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 стадію економіки вони називають «водневою економікою», вважаючи, що вона є «образом майбутнього» для глобальної економіки, у якій водень стає новим глобальним енергоносієм і починає відігравати роль, порівнянну 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, ґрунтованого на водні» [2] за рахунок розвитку водневого технологічного ланцюжка та проектів експорту водню з Австралії, Норвегії та з Близького Сходу, а також використання водню у мільйонах домогосподарств. Наголошується також про сотні «водневих» пілотних проектів у Німеччині, Великобританії, США, Південній Кореї. Заяви щодо економічної конкурентоспроможності водню по відношенню до вуглеводнів, набагато більшої ролі водневої енергетики порівняно з разом узятими гідро-, біо- та атомною енергетикою та міжконтинентальним транспортуванням [1] практично нічим не підкріплені.

Актуальною стала необхідність реально оцінити основні аспекти водневої енергетики й технологій та спрогнозувати їхній можливий розвиток. Спробу такої оцінки реального значення водневої енергетики було здійснено декілька років тому в Росії [3]. У висновках роботи зазначається енергетична неефективність водневої енергетики і наголошується, що однією з причин активної пропаганди «водневої революції», можливо, є «спроба втягнути Росію з її вкрай мізерними ресурсами, що виділяються на НДР, у технологічну гонку типу програної гонки озброєнь». Ініціаторам водневих проек-

тів в Україні слід також приймати до уваги відповідність вартості проектів можливостям їхнього фінансування.

Сьогодні загальне світове виробництво водню оцінюється близько 75 млн. тонн, з яких третина використовується у нафтохімічній промисловості, а дві третини – для виробництва мінеральних добрив. Незначна кількість водню використовується у машинобудуванні як захисна атмосфера.

Водень – штучне паливо, у чистому вигляді він у природі відсутній. На його виробництво потрібно більше енергії, ніж можна отримати у разі його використання. Таким чином, виробництво електричної або теплової енергії з водню є енергетично збитковим. Сировиною для виробництва водню 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 залежить від вихідної сировини. Оксид вуглецю шляхом екзотермічної реакції з водяною парою перетворюють на водень та двоокис вуглецю, який 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/кг H₂, що становить у перерахунку \$ 0,18–0,45/м³ H₂. Конверсією вуглеводнів, нафти та вугілля за різними оцінками отримують 95–99 % водню, решту від 0,1 до 5% – електролізом. Вартість виробництва конверсією у 2–5 разів менша, ніж електролізом. Витрата електричної енергії на виробництво 1 м³ водню електролізом у середньому становить 5 кВтг, а у найкращих сучасних електролізерах – 4 кВтг, тобто собівартість електролізного водню становитиме \$ 0,9–2,25/м³, що практично співпадає із значеннями, наведеними у [1] з посиланнями на розрахунки, виконані в Німеччині [4]. У роботі [3] ККД виробництва водню електролізом по відношенню до первинного палива оцінюється у 23%.

Електроліз однієї тонни 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 водню.

Водень, отриманий конверсією метану (SMR, steam methane reforming), називають «сірим», оскільки його виробництво пов'язане з емісією в атмосферу діоксиду вуглецю – 10 кг CO₂/кг H₂. Якщо конверсія супроводжується вилученням та захороненням CO₂ (CCS – carbon capture and storage), то отриманий у такому процесі водень називають «блакитним». Водень, отриманий електролізом із використанням електроенергії з відновлюваних джерел, називають «зеленим». 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 за кг, а ціна утилізації CO₂ – майже 70 євро за тонну CO₂ [1]. 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 Hydrogen Energy Supply Chain (HESC). Метою проекту є випробування виробництва водню газифікацією бурого вугілля, зрідження газоподібного водню та завантаження його на перший у світі спеціалізований транспорт для транспортування його в межах Азійсько-Тихоокеанського регіону. Уряд Австралії розглядає цей проект як «вирішальний крок» на шляху перетворення Австралії у світового лідера в галузі виробництва водню.

Основна частина водневих проектів концентрується навколо виробництва «зеленого» водню, до якого виявляє інтерес і атомна енергетична галузь. Повідомляється про початок будівництва у 2019 році в Німеччині найбільшої у світі установки з виробництва 1300 тонн (14,4 млн. м³) водню щорічно методом електролізу. Такий об'єм газу може забезпечити електрогенеруючу установку потужністю всього 2 МВт, що в 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.

Водень як паливо. Зазначимо, що енергетичний потенціал водню – його теплотворна спроможність – становить 2,96 кВтг. Енергетична цінність водню у 3,3 рази менша, ніж метану. Вона менша у 3,2 рази, ніж у природного газу. Це треба враховувати у розрахунках трубопроводів та пальникових пристроїв у разі заміщення природного газу воднем. У процесі застосування водню у котельних установках необхідно дотримуватись 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. Водень спричиняє так звану водневу корозію металів та призводить до їхньої крихкості. 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 рік нараховувалося всього 4,5 тис. км водневих трубопроводів, з них у США – 2,6 тис., у решті країн – по декілька сотень кілометрів [1].

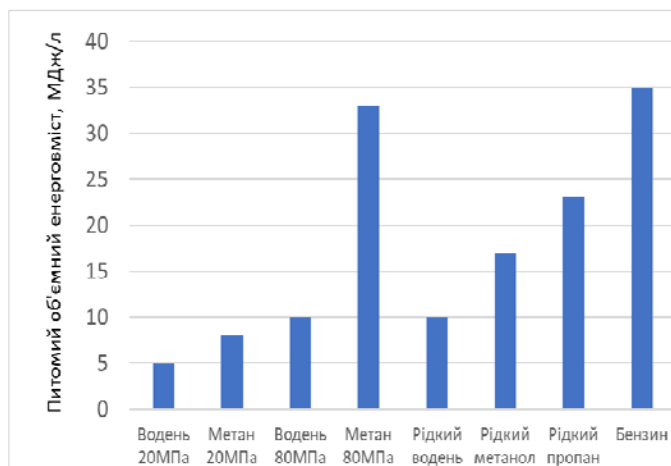
Використання чистого водню як палива в системах індивідуального опалення «у мільйонах домогосподарств» викликає сумніви через вказані вище причини. У перспективі можливе використання в системах опалення сумішей природного газу та водню. Характеристики метано-водневих сумішей, необхідні для розрахунків паливних систем, можна визначати за принципом адитивності. В подальшій перспективі можна очікувати використання в системах індивідуального опалення високо-температурних паливних елементів із воднем як робочу речовину, де первинним енергоносієм буде природний газ або пропан-бутан. Випробовування таких систем індивідуального опалення в Європі вже почалося.

Ефективне та безпечне функціонування Об'єднаної енергетичної системи України вимагає наявності маневрених потужностей [5] для регулювання добових та сезонних навантажень, а також збільшення в енергосистемі частки відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). 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 енергосистемою України, оцінює потребу у маневруючих потужностях у 2,5 ГВт. 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 8000 годин) за рахунок використання водню (ККД 40%) його потрібно 16,8 млрд.м³. Беручи до уваги, що завантаження маневруючих потужностей складає біля третини вказаного часу, неважко підрахувати, що на виробництво 6,3 млрд.м³ Н₂ потрібно витратити 25 млрд. кВтг. Виробляти енергію на основі традиційних джерел задля того, щоб використати її на електроліз, суперечить цілям водневої енергетики, Тому такий сценарій слід вважати нездійсненним.

Один із гіпотетичних сценаріїв моделі німецької енергосистеми, розроблений спеціалістами Energy Brainpool, передбачає її функціонування у 2040 році на 100% на основі ВДЕ [6]. Як відомо, Німеччина зобов'язалася закрити до того часу всі вугільні та атомні електростанції. Розглядається варіант, яким чином система зможе пройти періоди екстремально похмурої погоди (kalte Dunkelflaute), які трапляються в Німеччині, особливо наприкінці січня – початку лютого. Визнано, що без «гнучких» газових резервних потужностей система функціонувати не зможе. Потужність встановлених газових (парогазових) електростанцій згідно з моделлю повинна складати 67 ГВт, що перевищує потужність всіх засобів генерації в Україні разом узятих. Вартість встановлення такого обсягу потужностей можна оцінити близько \$ 140 млрд. Річний коефіцієнт використання встановленої потужності (КВВП) таких станцій не перевищить 20%. Оскільки сценарій передбачає енергопостачання тільки від ВДЕ, то такі станції будуть працювати виключно на газі електролізу, електроенергія для якого буде вироблятися сонячними та вітровими установками у періоди сприятливої погоди. Висновок спеціалістів Energy Brainpool про те, що ціна виробленої енергії буде доступною – 5,7–9,5 євроцентів за 1 кВтг (1,6–2,7 грн. за курсом жовтня 2019 р.) викликає неабиякі сумніви. Навіть для потужної німецької економіки витрати на реалізацію такого сценарію невиправдані.

Водень у транспортній енергетиці. Іншим напрямком масштабного використання водню, як вважається, у найближчому майбутньому буде використання його як пального для транспорту. Станом на 2019 рік [1] кількість автомобілів на водні у світі становила 5 тис. одиниць, насамперед у США, Західній Європі та Японії, а кількість заправних станцій – 300 одиниць. Автори [1] вважають,

що причиною повільного становлення транспорту на водні є проблема «курки та яйця» – без розвитку необхідної інфраструктури масовий випуск автомобілів на водні неможливий. У процесі реалізації цього напрямку з технологічної точки зору на першому плані – проблеми транспортування та зберігання водню. Як було зазначено вище, транспортування водню існуючими газопроводами неприпустиме. Вартість постачання водню трубопроводами та його розподілу оцінюється у \$ 1/кг, тоді як вартість цих операцій для бензину становить \$ 0,19 за галон (2,6 кг) [7]. Тому для транспортування водню потрібні або спеціально спроектовані газопроводи, або його треба здійснювати у стисненому або зрідженому стані. Розглядаються також технології транспортування водню у зв'язаному стані з аміаком або вуглеводнями, які енерговитратні і складні у реалізації, або у хімічних сполуках з вуглеводнями, що не відповідає цілям безвуглецевої енергетики.



Енергетичний вміст палив, які використовуються або можуть використовуватися як моторні, показано на рисунку. [3]. На практиці у разі використання стисненого природного газу як моторного палива він стискується у ємностях до 20 МПа. Виходячи із співвідношення теплотворних спроможностей природного газу та водню (3,2), для однакового запасу енергії на борту транспортного засобу потрібно забезпечити тиск водню 64 МПа. Для зберігання водню під тиском 350–700 атм. (35–70 МПа) зараз використовують полегшені композитні балони, виготовлені з вуглецевого

волокна, армованого алюмінієвими або полімерними волокнами. Такі високотехнологічні ємності дуже дорогі. Вартість одного балона співставна з вартістю бюджетного автомобіля. Навіть при 700 атм. водень містить енергії на одиницю об'єму у 4,6 разів менше, ніж бензин, що означає, що розмір водневого баку мусить бути у стільки ж разів більшим [7]. Розміщення такої ємності на автомобілі незручне і небезпечне. Крім того, біля 10–15% енергії водню витрачається на компресію. Енергетичні витрати для сучасного багатостадійного компресора дорівнюють близько 5 кВтг на 1 кг стисненого до 70 МПа водню, що в перерахунку на первинну енергію за ККД генерації 33% становить як мінімум 50 МДж/кг, тобто 35% об'єму водню [3]. Щодо транспортування водню до споживача у стисненому стані в умовах централізованого його виробництва, то один трубчатий трак вагою 40 тонн може нести всього 320 кг водню, стисненого до 20 МПа, що становить менше 1% його власної ваги. По суті перевезення водню у стисненому стані є перевезенням тари. Для порівняння, такий трак може нести 26 тонн бензину, енергетична ємність якого у 20 разів більша, ніж у водню. Транспортування дорогами загального призначення такого легкозапалювального та вибухового газу само по собі небезпечне.

Окремо розглядається технологія транспортування водню у суміші з природним газом по існуючих газопроводах. У [1] зазначається, що у різних країнах долі підмішування водню до природного газу різні – від 0,1% у Бельгії, Великобританії та США, до 10% – у Німеччині та 12% – у Нідерландах. За даними Агентства з відновлюваної енергетики ОАЕ стверджується можливість підвищення планки до 15% без змін у газотранспортних системах. У Великобританії досліджувалася можливість транспортування водню існуючими газопроводами [8]. Висновок проекту полягає в тому, що період адаптації існуючих систем до транспортування водню буде довгим та вартісним.

В Україні спеціальних досліджень не проводилося, і документів щодо припустимих концентрацій водню у суміші з метаном не існує.

Зберігання та транспортування водню у зрідженому стані дуже витратне як з енергетичної, так і економічної точок зору. Температура зрідження водню становить 20 К (– 253 °С). На його зрідження витрачається до 40% енергії, що в ньому міститься. Рідкий водень має високий вміст енергії – 120 МДж/кг (33,3 кВтг/кг) порівняно з бензином – 44,4 МДж/кг (12,4 кВтг/кг). Ємності для транспортування рідкого водню мають подвійний корпус та вакуумну теплоізоляцію і мають високу вартість. Мають місце втрати водню внаслідок випаровування у процесі його зберігання. До цього часу транспортування водню у рідкому стані використовувалося у виключних випадках, як, наприклад, від Космічного центру НАСА у Флориді до супутника. Автори огляду [7] висловлюють небезпідставні сумніви, що такий метод транспортування знайде широке застосування. Як було зазначено вище, існують

й інші точки зору, наприклад, наміри Австралії щодо транспортування водню в регіоні у рідкому стані. 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 вартісних ємностей для його зберігання та є вибухонебезпечним.

Для заміщення в Україні рідких моторних палив електролітичним воднем його знадобиться 31,4 млрд.м³ та необхідно витратити 125,7 млрд. кВтг електроенергії для його виробництва, що майже дорівнює сумарному обсягу споживання електроенергії у країні. Щоденна потреба у воді становитиме 70 тис. тонн. Автори [7] підраховали, що для заміщення бензину електролітичним воднем у економіці США обсяг його щоденного виробництва має становити 0,34 млн. тонн, для чого потрібно щоденно використовувати 3 млн. тонн води; при цьому буде вироблятися 2,7 млн. тонн кисню. Встановлена потужність електрогенерації має становити 850 ГВт, що більше існуючої сумарної потужності енергосистеми України. Особливо важко уявити можливість виробництва необхідної кількості енергії відновлюваними джерелами.

Розглядається також зберігання водню у вигляді металогідридів, дослідження яких сьогодні сфокусовано на легких з'єднаннях водню з лужними та лужноземельними металами NaH, MgH₂, NaAlH₄, LiBH₄, LiNH₂ [7]. Максимальна теоретична гравіметрична ємність NaAlH₄ становить 7,4% вагових, реальна по відношенню до ваги всього обладнання – 5,5%. Внаслідок великої відносної ваги та труднощів щодо підтримання температурних режимів сорбції–десорбції водню використання металогідридів на автотранспорті не знайшло застосування. Не підтверджена також можливість реверсу установки протягом тисяч циклів із зазначеними та іншими матеріалами. Відомо про негативний досвід випробування металогідридів на декількох таксі у Харкові у 70-ті роки.

Основним пристроєм для використання водню на транспортних засобах є паливні елементи. Отриманий електролізом водень для паливних елементів може зберігатися на борту транспортного засобу у стисненому або зрідженому станах. Проблематичність та недоліки такої технології розглянуті вище. Для уникнення проблем, пов'язаних із подібним зберіганням водню, його можна виробляти безпосередньо на транспортному засобі шляхом конверсії (риформінгу) метану або вуглеводнів, наприклад, метанолу. В одному літрі метанолу міститься більше водню, ніж в одному його літрі у зрідженому стані – 98,8 г/л у метанолі за кімнатної температури та відповідно 71 г/л у рідкому водні за температури 253°C. Викидними продуктами риформінгу є двоокис вуглецю та вода, тобто основна мета використання водню як моторного палива – запобігання викидам в атмосферу вуглецю у процесі не досягається. Економічний вигравш використання паливних елементів у порівнянні з безпосереднім використанням 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 і низької напруги, для перетворення якої у змінний струм потрібної напруги необхідно витратити 10% від виробленої кількості, що зменшує загальний ККД до 38%. Мають місце додаткові втрати ефективності пристрою під час 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 сягає 25 МВт.

Незважаючи на проблематичність становлення водневої енергетики, у світі розробляються крупні проекти щодо виробництва і використання водню. Про австралійський проект вже згадувалося. За інформацією журналу PEI (Power Engineering International) від 24.10.2019 в статті «Hydrogen vehicles celebrate refueling network with road trip» сповіщається про пробіг 13-ти авто на водні з п'яти європейських країн до Гамбурга з метою демонстрації «водневої мобільності» (hydrogen mobility) та переваг керування водневими авто. Захід проводився за рахунок загальноєвропейського проекту рп- European Hydrogen Mobility Europe (H2ME) project. За кошти проекту у Німеччині побудовано вже 32 водневих заправних станції і до 2022 року планується довести їхню кількість до 49. «Водневі» проекти, проекти «Power to Gas» існують і у ряді інших країн. В основі уваги до проблеми змін клімату і відповідно водневої енергетики та водневої економіки є те, що на її вирішення виділяються великі кошти, у чому зацікавлені видобувні, паливні, енергетичні, транспортні, автобудівні та суміжні компанії, а також велика кількість наукових організацій у всьому світі. Проблема клімату штучно підтримується політиками та кліматичними активістами.

Висновки. Оскільки водень у вільному стані у природі відсутній, його слід розглядати як похідний енергетичний ресурс на зразок електричної енергії. Основною технологією виробництва вод-

ню є парова конверсія метану, в меншій мірі – вугілля або нафтопродукти. Оскільки за такої технології виробництва у атмосферу викидається двоокис вуглецю, використання її не відповідає вирішенню проблеми безвуглецевої енергетики. Близько 5% водню («зеленого») виробляється електролізом води. На виробництво 1 м³ водню електролізом витрачається 4–5 кВтг електричної енергії, а енергоспоживання становить 2,9 кВтг. Теплотворна спроможність водню у 3,2 рази менша за теплотворну спроможність природного газу. Він має у п'ять разів ширші межі запалювання та майже у 10 разів більшу швидкість розповсюдження полум'я у порівнянні з природним газом, характеризується високою проникністю та призводить до водневої корозії металів. Системи транспортування водню потребують спеціального проектування, а використання його як палива – особливих заходів безпеки.

Використання водню як палива для маневруючих 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 стисненому стані невідгидне, оскільки потребує надмірно важких ємностей за незначного вмісту в них водню та значних витрат на стиснення до кількох сот бар. Зрідження водню потребує до 40% затрат енергії, що у ньому міститься. Вартість криогенної ємності для зрідженого водню співмірна з вартістю деяких авто. Транспортування водню у стисненому або зрідженому стані по дорогах загального призначення небезпечне.

Електрична енергія з відновлюваних джерел в Україні дотована, її вартість у рази більша, ніж отриманої з традиційних джерел. Витрачання електричної енергії на виробництво «зеленого» водню для подальшого виробництва з нього електроенергії у паливних елементах явно недоцільне.

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

1. Митрова Т., Мельников Ю., Чугунов Д. Водородная экономика – путь к низкоуглеродному развитию. Сколково: Центр энергетике Московской школы управления Сколково. 2019. 60 с.
2. 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. 120 с.
3. Асланян Г.С., Реутов Б.Ф. Проблематичность становления водородной энергетики. *Теплоэнергетика*. 2006. № 4. С.66-73.
4. Grube T., Hohlein B. Costs of Making Hydrogen Available in Supply Systems Based on Renewables. *Hydrogen and Fuel Cells*. Springer, 2016. P. 223-237.
5. Кириленко О.В. Интеллектуальні електричні мережі: елементи та режими. Київ: Ін-т електродинаміки НАН України, 2016. 400 с.
6. Сидорович В. Работа энергосистемы, основанной на ВИЭ, в пасмурную и безветренную погоду. URL: <http://renen.ru/on-the-viability-of-energy-systems-operating-on-the-basis-of-100-res/> 02.08.2017.
7. Armaroli N., Balzani V. The Hydrogen Issue (Review). *European journal of chemical physics and physical chemistry*. 2011. No 4. Pp. 21–36. DOI: <https://doi.org/10.1002/cssc.201000182> .
8. Preparing for the hydrogen economy by using the existing natural gas system as a catalyst (NATURALHY). CORDIS EU research results. Project information. Start date 1 May 2004, End date 31 October 2009. URL: <https://cordis.europa.eu/project/rcn/73964/factsheet/en> .
9. Карп И. Кто управляет климатом? *Зеркало недели*. 2019. No 25.

ВОДОРОД В ЭЛЕКТРО- И ТРАНСПОРТНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

И.Н.Карп, академик НАН Украины

Институт газа НАН Украины,

ул. Дегтяревская, 39, Киев, 03113, Украина. E-mail: karpkiev@gmail.com

Показано, что на производство водорода расходуется больше энергии, чем можно получить при его использовании. Речь идет о производстве «зеленого» водорода. На производство 1 м³ водорода расходуется от 4 до 5 кВтч электроэнергии, при том, что в нем содержится химической энергии 2,9 кВтч. Теплотворная способность водорода в 3,3 раза меньше, чем метана. Водород как вещество характеризуется высокой проникающей способностью, его транспортировки в обычных трубах вызывает их коррозию и охрупчивание. Реализация этого процесса требует применения специальных материалов для трубопроводов, а также специального проектирования, компрессоров, сенсоров. Водород имеет широкие пределы взрываемости, большую скорость рас-

пространения факела, его использование связано с применением специальных мер безопасности. Использование водорода в качестве топлива для привода маневровых газовых мощностей в энергосистеме или для замещения жидких моторных топлив требует электрогенерирующих мощностей на его производство сопоставимых с установленной мощностью всей энергосистемы Украины, значительных объемов воды и необходимости решения проблемы использования кислорода. Расход электроэнергии для получения водорода для топливных элементов значителен и поэтому превращение его снова в электроэнергию явно нецелесообразно. С учетом стоимости электроэнергии из возобновляемых источников и экономики производства водорода с последующим его использованием невыгодно. Аналогичный вывод можно сделать относительно транспортировки водорода в сжатом или сжиженном состоянии. Драйвером водородной энергетики является желание предотвращения антропогенному воздействию на изменение климата. Большое количество проектов по водородной энергетике, которые сегодня введены в Европе и в мире, можно объяснить значительными средствами, выделяемыми на исследование этой проблемы. Во внедрении таких проектов заинтересованы крупные компании и ученые - водородные активисты. Библ.9, рис 1.

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

HYDROGEN IN ELECTRIC AND TRANSPORT POWER ENGINEERING

Karp I.M.

The Gas Institute of NAS of Ukraine,

39 Degtyarivska Str., 03113, Kyiv, Ukraine. E-mail: karpkiiev@gmail.com

It is shown that more energy is consumed in hydrogen production than can be obtained from its use. We are talking about the production of green hydrogen. The production of 1 m³ of hydrogen consumes 4 to 5 kWh of electricity, although it contains 2.9 kWh of chemical energy. The calorific value of hydrogen is 3.3 times less than that of methane. Hydrogen as a substance is characterized by a high penetration capacity, its transportation in ordinary pipes causes their corrosion and embrittlement. The implementation of this process requires the use of special materials for pipelines, as well as special design, compressors, sensors. Hydrogen has wide explosive limits, high torch propagation rate, and its use is associated with the application of special safety measures. The use of hydrogen as a fuel to drive the gas maneuvering capacity in the grid or to replace liquid motor fuels requires generating capacity for its production commensurate with the installed capacity of the entire Ukrainian grid, significant volumes of water and solving the problem of using excess oxygen. The energy costs of producing hydrogen for fuel cells are quite significant, so converting it back to electricity is clearly inappropriate. Thus, given the cost of electricity from renewable sources and the economy of hydrogen production, its continued use is disadvantageous. A similar conclusion can be drawn regarding the transport of hydrogen in the compressed or liquefied state. The driver of hydrogen energy is the desire to prevent anthropogenic impacts on climate change. The large number of hydrogen energy projects that are being launched today in Europe and in the world can be explained by the considerable funds allocated to research this problem. Powerful companies and scientists - hydrogen acts - are interested in implementing such projects. References 9, figure 1.

Keywords: hydrogen, production, transportation, storage, efficiency.

1. Mytrova T., Melnikov Y., Chugunov D. The hydrogen economy is the way to low-carbon development. Skolkovo: Center for Energy of the Moscow School of Management Skolkovo. 2019. 60 p. (Rus.)
2. 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.
3. Aslanyan G.S., Reutov B.V. Problematicity of hydrogen energy formation. *Теплоенергетика*. 2006. No 4. Pp. 66-73. (Rus.)
4. Grube T., Hohlein B. Costs of Making Hydrogen Available in Supply Systems Based on Renewables. Hydrogen and Fuel Cells. Springer, 2016. Pp. 223-237.
5. Kyrylenko O.V. Intellectual Electrical Networks: Elements and modes. Kyiv: Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine. 2016. 400 p. (Ukr.)
6. Sydorovich V. Operation of the power system based on RES in cloudy and windless weather. Access mode: <http://renen.ru/on-the-viability-of-energy-systems-operating-on-the-basis-of-100-res/> (Rus.) 02.08.2017.
7. Armaroli N., Balzani V. The Hydrogen Issue (Review). *European journal of chemical physics and physical chemistry*. 2011. No 4. Pp. 21-36. DOI: <https://doi.org/10.1002/cssc.201000182>.
8. Preparing for the hydrogen economy by using the existing natural gas system as a catalyst (NATURALHY). CORDIS EU research results. Project information. Start date 1 May 2004, End date 31 October 2009. URL: <https://cordis.europa.eu/project/rcn/73964/factsheet/en>.
9. Karp I. Who controls the climate? *Zerkalo nedeli*. 2019. No 25. (Rus.)

Надійшла 07.11.2019
Остаточний варіант 02.01.2020