

МІЖГАЛУЗЕВІ ПРОБЛЕМИ І СИСТЕМНІ ДОСЛІДЖЕННЯ В ПАЛИВНО- ЕНЕРГЕТИЧНОМУ СЕКТОРІ CROSS-BRANCH PROBLEMS AND SYSTEM RESEARCH IN THE FUEL AND ENERGY SECTOR

УДК: 661.96:66.074.36(082)

DOI 10.20535/1813-5420.1.2022.259125

С.Ю. Бойченко, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-2489-4980

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

І.О. Шкільнюк, д-р техн. наук, доц., ORCID 0000-0002-8808-3570

Національний авіаційний університет

О.Б. Целіщев, канд. техн. наук, ORCID 0000-0002-5758-2908

Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля

І.В. Матвійв, ORCID 0000-0003-3989-2651

Національний авіаційний університет

О.В. Тарасюк, ORCID 0000-0001-6697-1078

Інститут циркулярної та водневої економіки

Артур Яворскі, ORCID 0000-0002-1599-1711

Павел Вос, ORCID 0000-0003-2730-3258

Ряшівська політехніка ім. Ігнатія Лукасевича, Ряшев, Польща

СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ГЕНЕРУВАННЯ ТА АКУМУЛЯЦІЇ ВОДНЮ. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ТЕОРЕТИЧНОГО ТА ПРАКТИЧНОГО ДОСВІДУ

У статті розглянуті питання конкурентоспроможності альтернативних палив і технологій у швидко зростаючому сегменті легкового автотранспорту та авіації, який в глобальному масштабі споживає більше 70% палива, що витрачається на пасажирські перевезення і близько 45% в цілому по транспорту. Поява нових технологій в персональному автотранспорті (електромобілі, водневі авто з паливним елементом, біопалива, природний газ і ін.) змушує по-новому поглянути на перспективи розвитку цього сегмента. На підставі такого підходу проведена оцінка способів виробництва водню. Порівняно виробництво водню паровою конверсією метану, електролізом води та біохімічним виробництвом.

Водень - не джерело енергії, це засіб перетворення інших джерел енергії в хімічну енергію в формі накопичувального чистого водню, яку можна використовувати згодом при його окисненні. По суті, резервуар або інший накопичувач водню в технічному сенсі подібний до акумуляторної батареї або бензобаку, і тому порівнювати треба не тільки коефіцієнт корисної дії, а й інші параметри. Водень потрібно виробити і перетворити для отримання кінцевої енергії, і те й інше вимагає енергії.

Переваги водню як універсального енергоносія визначається екологічною чистотою, гнучкістю і ефективністю процесів перетворення енергії з його участю. Технології різномасштабного виробництва водню досить добре освоєні і мають практично необмежену сировинну базу.

Важливість технологій отримання водню визначається високою теплою згорання водню та можливостями зниження викиду парникових газів, оскільки продуктом згорання є звичайна вода.

У статті наведений порівняльний аналіз способів зберігання водню в рідкому та газоподібному станах, вуглецевих структурах і гідридах металів

Ключові слова: водень, моторне паливо, воднева енергетика, потенціал водню, паливний елемент, виробництво водню, способи зберігання водню, водневий двигун.

Вступ. Транспорт є найважливішим елементом світової економічної системи. В основі розвитку транспортної системи лежить принцип мобільності – людей, товарів, інформації, ідей. Мобільність – одна з найбільш фундаментальних і важливих характеристик економічної або соціальної діяльності людства,

оскільки вона задовольняє основну потребу суспільства в переміщенні себе та інших об'єктів. Ефективність мобільності визначається концентраціями переміщення потоків, швидкостями їх проходження по каналах зв'язку, надійністю зв'язків і зручностями переміщення в ланцюзі від джерела до споживача. Практична реалізація мобільності здійснюється через системи транспортних зв'язків, що включають технічні засоби і відповідні об'єкти транспортної інфраструктури. Низька ефективність транспортних систем перешкоджає розвитку економічних і соціальних систем через низку факторів, зокрема використовуваних технологій транспортних засобів. Таким чином, ефективна транспортна система забезпечує функціонування транспортної інфраструктури та стає важливим каталізатором економічного розвитку країни та суспільства.

З іншого боку, на розвиток транспортної галузі впливають дві глобальні проблеми: світовий дефіцит нафти та забруднення навколишнього середовища викидами шкідливих речовин з відпрацьованими газами (ВГ) різних видів техніки. Суттєво вирішити ці проблеми можна використанням альтернативних моторних палив. Раціональний вибір альтернативних палив дозволяє вирішити відразу два завдання: підвищити екологічну безпеку транспортних засобів та зменшити використання нафти на потреби транспорту.

Одним з основних світових трендів "палива майбутнього" стала так звана декарбонізація транспортних систем. Декарбонізація – це поступова відмова від традиційних джерел енергії (викопних вуглецевих сполучень, нафти, вугілля, природного газу, торфу та інших) і все більш активний перехід на відновлювальні енергоносії, наприклад, водень.

Відмова світу від викопних джерел енергії, перехід на відновлювальні типи джерела енергії, боротьба з шкідливими викидами в атмосферу, зменшення залежності від вуглеводнів визначають водень і паливні елементи на його базі як ключові фактори подальшого розвитку енергетики, транспорту і інших галузей промисловості.

Виходячи з привабливих умов для генерації відновлюваної енергетики в Україні, водень може бути каталізатором економічного зростання і підвищення енергетичної безпеки країни, забезпечуючи скорочення викидів вихлопних газів. Використання «зеленого» водню в якості палива для транспортної галузі відповідає цілям безвуглецевого розвитку, заявленим у міжнародних зобов'язаннях багатьох держав, в тому числі й України, та відповідає цілям Організації об'єднаних Націй (ООН) щодо сталого розвитку. Головним завданням для їх реалізації є знання реального потенціалу країни щодо виробництва та застосування водню.

У 2018 році Україна прийняла «Національну транспортну стратегію України» до 2030 року. Одним із пріоритетів, визначених цією Транспортною стратегією, є зменшення негативного впливу транспорту на навколишнє середовище. Також цілями Транспортної стратегії є підвищення якості та безпеки транспортних послуг, а також покращення транспортної інфраструктури за європейськими стандартами. Відповідно до Національної транспортної стратегії очікується, що до 2030 року рівень використання альтернативних видів палива (біоетанолу, біодизеля) та електроенергії зросте до 50%. «Національна транспортна стратегія», «Стратегія розвитку енергетики» та «Дорожня карта широкого впровадження водневої енергетики в Україні» є міцною стратегічною основою політики, спрямованої на збільшення частки відновлюваних джерел енергії в транспорті на основі біопалива, електроенергії та водню. Проект Закону України «Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо розвитку виробництва рідкого біопалива», який наразі перебуває у політичній дискусії, внесе зміни до законів та законодавчих актів щодо обов'язкових квот на біокомпонентну частку в обсязі реалізованого моторного палива, включаючи відповідальність за недотримання квот, а також за критерії сталого розвитку. Також буде введена термінологія в області рідкого біопалива, що відповідає RED II (переглянутій Директиві ЄС з відновлювальної енергетики).

Мета роботи і завдання дослідження.

Метою роботи є дослідження методів виробництва та зберігання водню.

Об'єкт дослідження – процес генерування та акумуляції водню на транспортних засобах.

Предмет дослідження – методологічні основи використання водню як моторного палива в засобах технологічного транспорту.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Встановлено, що водень перетворюється в електроенергію в електрохімічних генераторах (паливних елементах – ПЕ). ПЕ більш ефективні, ніж звичайні двигуни внутрішнього згорання (ДВЗ), і не утворюють викиди вихідних газів, так як вони тільки виділяють водяний пар. Найбільш поширеним типом паливного елемента для застосування в транспортних засобах є паливний елемент з полімерним електролітом. Електроенергія надходить на електродвигуни, які приводять в рух автомобіль. В цьому відношенні водневий автомобіль з ПЕ, як і електромобіль, використовують в якості кінцевого енергоносія електроенергію. Однак, в електромобілі ця електроенергія виробляється за межами автомобіля і зберігається в електроакумуляторі, а в автомобілі з ПЕ вона генерується безпосередньо на борту автомобіля з водню, який проводиться за його межами по одному з відомих методів і зберігається всередині автомобіля в спеціальних ємностях в стисненому або зрідженому

виді. Так як і електромобіль автомобіль з ПЕ в міських умовах є практично чистим паливом, які не мають викидів в атмосферу.

Використання ПЕ було винайдене більше 160 років тому (1837 г.). Ця технологія старша двигуна внутрішнього згорання або електричної батареї. Однак активний розвиток технологій використання ПЕ почалося після Другої світової війни в зв'язку з розвитком космічної техніки.

Водень є майже ідеальним електропаливом і довгий час вважався основним енергоносієм майбутніх енергетичних систем (див., наприклад, [18]). Хоча водень має найвищу гравіметричну щільність енергії серед всіх видів палива, однак він має дуже низьку об'ємну щільність енергії і високий коефіцієнт дифузії, що ускладнює його зберігання [19].

На даний момент, на ринку є всього кілька прототипів автомобілів з ПЕ (Honda FCX Clarity, Hyundai Tucson Fuel Cell, Toyota Mirai, Hyundai Nexa). Багато компаній мають просунуті концепції і прототипи, які можуть з'явитися у продажу в найближчі роки.

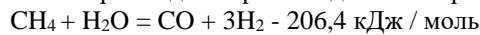
В автомобілі з ПЕ найбільш проблемними чинниками залишаються:

- 1) вартість водню і пов'язана з ним інфраструктура виробництва, доставки і зберігання;
- 2) ступінь досконалості ПЕ як енергетичної машини;
- 3) зберігання водню на борту автомобіля.

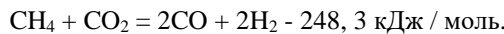
Основна частина. Водень практично не зустрічається в природі в чистій формі і повинен вилучатися з інших з'єднань за допомогою різних хімічних методів. Важливість технологій визначається високою теплою згорання водню та можливостями зниження викиду парникових газів, оскільки продуктом згорання є звичайна вода. Стосовно технології одержання водню необхідно відзначити, що він є вторинним енергоносієм і в природі зустрічається тільки у виді різних сполук.

Парова конверсія метану. У процесі конверсії метану водяною парою, діоксидом вуглецю, киснем та оксиду вуглецю водяною парою протікають наступні каталітичні реакції. Розглянемо процес отримання водню конверсією природного газу (метану).

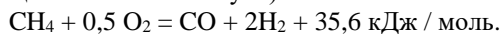
Отримання водню здійснюється в три стадії. Перша стадія - конверсія метану в трубчастій печі:



або



Друга стадія пов'язана з доконверсією залишкового метану першої стадії киснем повітря і введенням в газову суміш азоту, якщо водень використовується для синтезу аміаку. (Якщо виходить чистий водень, другої стадії принципово може і не бути).



І, нарешті, третя стадія - конверсія оксиду вуглецю водяною парою:

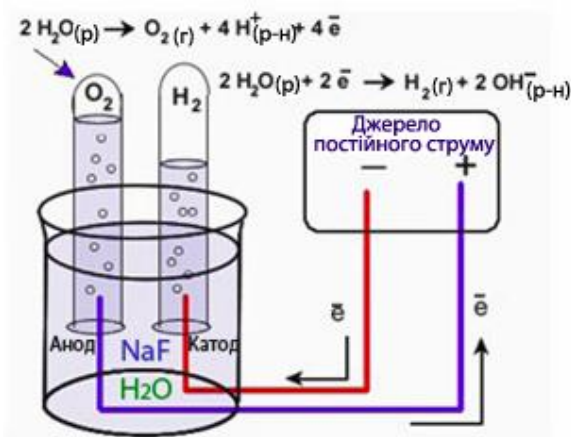
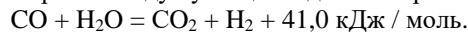


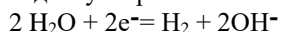
Рисунок 1 - Схема електролізу води

Для всіх зазначених стадій потрібно водяна пара, а для першої стадії -багато тепла, тому процес в енерго-технологічному плані проводиться таким чином, щоб трубчасті печі зовні обігрівалися спалюється в печах метаном, а залишкове тепло димових використовувалося для отримання водяної пари.

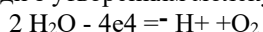
Електроліз води. Як відомо, при проходженні електричного струму через розчини електролітів на електродах відбувається розряд іонів і протікають пов'язані з цим хімічні реакції. Протікання процесу

електролізу визначається переносом електричного струму в рідині та умовами розряду присутніх у розчині іонів електроліту (рис.1).[13]

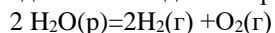
На катоді відбувається відновлення води з утворенням іонів OH^- з молекул H_2 :



На аноді здійснюється окиснення води з утворенням молекул O_2 і іонів H^+ :



Дія електричного струму призводить до окисно-відновної реакції:



Електроліз води один з найбільш відомих і добре досліджених методів отримання водню. Він забезпечує одержання чистого продукту (99,6-99,9% H_2) [13].

Економіка процесу в основному залежить від вартості електроенергії. У виробничих витратах на отримання водню вартість електричної енергії становить приблизно 85%.

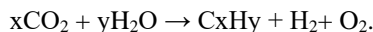
Цей метод отримав застосування в ряді країн, що володіють значними ресурсами гідроенергії. Найбільш великі електрохімічні комплекси перебувають у Канаді, Індії, Єгипті, Норвегії, але створені і працюють більше тисячі дрібних установок у багатьох країнах. Важливий цей метод і тому, що він є найбільш універсальним щодо використання первинних джерел енергії. У зв'язку з розвитком атомної енергетики можливий новий розквіт електролізу води на базі дешевої енергії атомних електростанцій.

Електрохімічний метод отримання водню з води володіє такими позитивними якостями [13]:

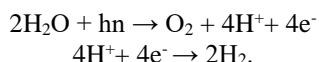
- 1) висока чистота одержуваного водню - до 99,9%;
- 2) простота технологічного процесу, його безперервність, можливість найбільш повної автоматизації, відсутність рухомих частин в електролітичному середовищі;
- 3) можливість отримання найцінніших побічних продуктів - важкої води та кисню;
- 4) загально доступна сировина - вода;
- 5) гнучкість процесу і можливість отримання водню безпосередньо під тиском;
- 6) фізичний поділ водню і кисню в самому процесі електролізу.

Біохімічне виробництво водню. Багатообіцяючою і перспективною альтернативою промисловим процесам отримання водню є розкладання води з використанням сонячної енергії в процесах фотосинтезу і біоконверсії [12].

Протягом фотосинтезу зелені рослини і морські водорості (мікроскопічні одноклітинні рослини) перетворюють вуглекислий газ, воду і сонячне світло (зелене світло з довжиною хвилі 500 нм) у вуглеводи, воду і кисень.



Сонячне світло поглинається світлочутливим пігментом, наприклад білком хлорофілу. За допомогою активних центрів цього білка енергія передається електронам, джерелом яких служить деяка донорна речовина. Потім, як і при фотосинтезі, електрони через проміжний зв'язок ферродоксін доставляються до іонів водню, відновлення яких до молекулярного стану відбувається під дією каталізатора біологічної природи:



Дослідження в галузі біологічних методів отримання водню носять поки пошуковий характер. Вчені Каліфорнійського університету в Берклі 1999 р. виявили, що якщо водоростям не вистачає кисню і сірки, то процеси фотосинтезу у них різко слабшають, і починається бурхливе вироблення водню [12].

Водень може виробляти група зелених водоростей, наприклад *Chlamydomonas reinhardtii*. Водорості можуть виробляти водень із морської води або каналізаційних стоків.

Фахівці, проводячи експерименти з синьо-зеленими водоростями, прийшли до висновку, що для забезпечення теплових потреб міста з населенням 1 млн людей і витратою 10 кВт на душу населення потрібна плантація площею 17,5 км². Така оцінка надмірно оптимістична, хоча майбутнє біохімічного виробництва водню обіцяє бути блискучим.

При вирощуванні морських водоростей як «енергетичного врожаю» необхідно підтримувати високу температуру. Непотрібне тепло від градирень ядерного реактора на 100 МВт підтримає 4047 гектар водойми з морськими водоростями. Ця водойма призведе до 4,5 кг органічної речовини на квадратний метр. Поставка додаткового вуглекислого газу збільшує норму на 50%, 22680 кг морських водоростей можуть бути розумно перетворені в 10 кВт·год метану [12].

Фотохімічні процеси, засновані на використанні енергії сонячного світла, дають найбільш довговічне рішення проблеми постачання нашої планети вторинною формою енергії в найбільш екологічно прийнятному вигляді і практично без обмежень за масштабом, і тому заслуговують найпильнішої уваги.

Силові установки на основі водневих паливних елементів. В основі принципу роботи паливних елементів є фізико-хімічні реакції. По суті, це ті ж свинцеві акумуляторні батареї, коефіцієнт корисної дії паливного елемента становить близько 45% (іноді більше).

У корпус воднево-кисневого паливного елемента (рис.2) поміщена мембрана (проводить тільки протони), що розділяє камеру з анодом і камеру з катодом. У камеру з анодом надходить водень, а в камеру катода - кисень. Кожен електрод заздалегідь покривають шаром каталізатора, в ролі якого нерідко виступає платина. При його впливі молекулярний водень починає втрачати електрони. У цей же час протони проходять через мембрану до катода і під впливом того ж каталізатора з'єднуються з електронами, що надходять зовні. У результаті реакції утворюється вода, а електрони з камери анода переміщуються в електроланцюг, з'єднаний з мотором. Простіше кажучи, ми отримуємо електричний струм, що і живить двигун.

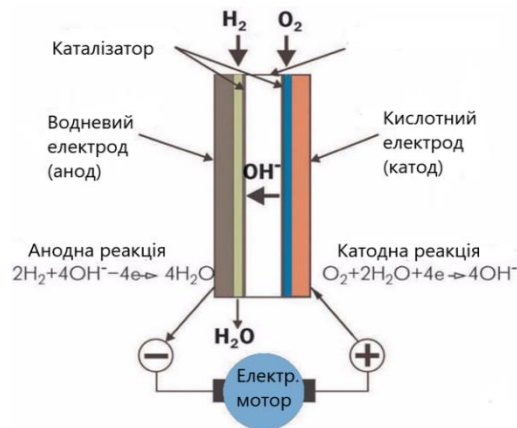


Рисунок 2 - Схема воднево-кисневого паливного елемента

Воднева система енергозабезпечення. Воднева система енергозабезпечення включає в себе поновлювані джерела енергії, наприклад сонячну батарею, що буде служити тільки для запуску електролізера. Генератор водню, то є електролізер генерує водень. «Далі водень надходить в ємність для зберігання водню, в нашому випадку металогідридний накопичувач водню. Наступним елементом даної системи є паливний елементи, що перетворюють хімічну енергію окислення водню в електричну. Паливні елементи виробляють електричну енергію до тих пір, поки на анод подається водень, а на катод – повітря. Енергоємність такої системи забезпечується обсягом запасені водню, а потужність – кількістю паливних елементів в батареї».

Зберігання водню. При великомасштабному використанні водню потрібні безпечні і ефективні системи його централізованого зберігання [14]. Стиснення і зрідження є основними способами ефективного зберігання водню, але стиснення водню споживає 15,5% внутрішньої енергії водню та зрідження – до 45% [19]. Використання водню в двигуні внутрішнього згорання або його окислення в паливному елементі ("холодне горіння") у даний час дає ефективність від 40% (горіння) до 55% (паливний елемент).

Водень може зберігатися в рідкому вигляді при його охолодженні до мінус 253 °С. Для охолодження водню до цієї температури потрібно затратити близько однієї третини енергії, що міститься в ньому (11 кВт·год / кг H₂), а для створення криогенних пристроїв необхідні спеціальні матеріали і технології. Наприклад, у своїй роботі Дж.І. Аллен [20.] демонструє, що буде потрібна велика реструктуризація та редизайн аеропортів. За його оцінками, для установки криогенного виробничо-складського приміщення зрідженого водню в типовому аеропорту приблизно у 700 рейсів на день буде потрібно побудувати об'єкт, що займатиме приблизно 70 акрів землі, і потребуватиме електропостачання близько 3,3 ГВт. Оскільки більшість електричної енергії в усьому світі виробляється вугільними електростанціями, що виділяють вуглець [21, 22], використання зрідженого водню повинно супроводжуватися масово прискореним використанням поновлюваних джерел енергії або переходом на більшу кількість ядерної енергії з усіма її потенційними недоліками [23]. Це особливо важливо розуміти, враховуючи, що електроенергія, вироблена з відновлюваних джерел енергії або ядерної енергії, навряд чи буде дешевою [24.].

Водень може також бути в запасі у вигляді газу. Цей процес вимагає для стиснення водню менше енергії, ніж для його зрідження. Водень в газовій фазі може бути накопичений в підземних порожнинах, родовищах природного газу. Так, при випробуваннях для зберігання використовувалися підземні ємності, водень в них утримувався під тиском 90 атм.

Відповідно до класифікації департаменту енергетики США, методи зберігання водневого палива можна розділити на 2 групи.

Перша група включає фізичні методи, які використовують фізичні процеси (головним чином, компресування або зрідження) для переведення газоподібного водню в компактний стан. Водень, який зберігається за допомогою фізичних методів, складається з молекул H₂, слабо взаємодіючих з середовищем зберігання. На сьогодні реалізовані наступні фізичні методи зберігання водню [15]:

Стиснений газоподібний водень:

- газові балони;
- стаціонарні масивні системи зберігання, включаючи підземні резервуари;
- зберігання в трубопроводах;
- скляні мікросфери.

Рідкий водень: стаціонарні і транспортні криогенні контейнери.

Друга група включає хімічні методи, в яких зберігання водню забезпечується фізичними або хімічними процесами його взаємодії з деякими матеріалами. Дані методи характеризуються сильною взаємодією молекулярного або атомарного водню з матеріалом середовища зберігання і є наступними: [15]

Адсорбційний водень:

- цеоліти і споріднені сполуки;
- активоване вугілля;
- вуглеводневі наноматеріали.

Абсорбція в обсязі матеріалу (металогідриди).

Хімічна взаємодія:

- алонати;
- фулерени і органічні гідриди;
- аміак;
- губчасте залізо;
- водореагуючі сплави на основі алюмінію і кремнію.

Порівняльна оцінка способів зберігання водню і їх переваги і недоліки, а також сучасні вимоги до них і показники різних методів зберігання водню в порівнянні з показниками зберігання еталонних вуглеводневих горючих представлені в табл. 1

Таблиця 1 - Оцінка основних методів зберігання водню [14, 15]

Спосіб зберігання	Переваги	Недоліки
Газоподібний водень (T = 300 K, p ≤ 20 МПа)	Технологія добре відпрацьована і доступна, щодо невеликої вартості	Низький об'ємний вміст (близько 7,7 кг / м ³ при тиску 10 МПа). Густина збереженої енергії при високих тисках (до 70 МПа) у порівнянні з рідким воднем, але технологія зберігання при таких високих тисках до кінця не відпрацьована
Рідкий водень (T = 20,4 K)	Технологія доступна, висока густина (71 кг / м ³)	Високі енерговитрати на скраплення, втрати водню, на випаровування, необхідність супер ізоляції, як наслідок, висока вартість
Вуглецеві наноструктури: нанотрубки, фулерени	Технології в перспективі можуть забезпечити високу густину зберігання водню (30-100 кг / м ³)	Виробництво вуглецевих структур недостатньо відпрацьовано, результати по утриманню водню невідтворені
Гідриди металів, сплавів, інтерметалевих з'єднань і композитів	Зручність і безпека зберігання в твердій фазі(у зв'язаному стані); ряд технологій досить добре відпрацьований	Недостатня ємність, необхідність підігріву, відносно висока вартість

При зберіганні водню в гідридах у всіх випадках зберігається 244 кг. Газоподібний водень зберігається в балонах (15 МПа), при цьому маса контейнера на 1 кг водню становить 98 кг. Рідкий водень зберігається в Дьюара по 6,5 кг. Маса контейнера на 1 кг газоподібного метану в балонах при 15 МПа складає 11 кг. Маса Дьюара на 1 кг рідкого метану становить 1,3 кг.

Аналіз і перспективи використання технологій акумулювання та зберігання водню як перспективного авіаційного палива.

Водневий двигун може зіграти ключову роль у декарбонізації авіації. Прогнозується, що він буде в два-три рази ефективнішим ніж застосування синтетичних палив у питаннях пошуку шляхів зниження впливу авіації на клімат. Оцінка, такого впливу є складною та недостатньо дослідженою областю [25]. Водень повинен надходити з низьковуглецевого джерела, яке буде використовуватися для декарбонізації.

Найбільш поширеними способами отримання низьковуглецевого водню є електроліз води, який є безвуглецевим методом, якщо живиться від поновлюваних джерел енергії ("CertifHy Green H₂", також відомий як "зелений H₂"), і вуглецево-нейтральний, якщо він виробляється реформінгом природного газу в поєднанні з уловлюванням і зберіганням вуглецю ("CertifHy Low Carbon H₂", також відомий як "синій H₂"). Обидва вони є реально можливими шляхами і можуть існувати паралельно.

Після виробництва водень необхідно або стискати, або зріджувати, а вже потім розподіляти по аеропортах спеціальними вантажівками з причепами для стиснутого або зрідженого водню для невеликих аеропортів або через трубопровід для великих аеропортів. Він також може бути конвертований, наприклад, в аміак, або рідкі органічні носії водню. Якщо водень не був зріджений на виробничому комплексі, то опинившись в аеропорту, він буде зріджений, та буде зберігатися в такому вигляді і в кінцевому підсумку передаватися літакам за допомогою заправних вантажівок або альтернативного методу заправки, такого як заправні платформи.

Найбільшою перешкодою для водневої авіації є відсутність інфраструктури: безпечного та надійного зберігання, розподілу зрідженого водню та використання водню на борту літаків. Безпосереднім пріоритетом для компонентів водневого ланцюгу постачання є розробка та проектування легких танкерних систем, надійних компонентів розподілу палива, водневих двигунів з низькими викидами оксиду азоту та тривалим терміном служби, а також високопотужними системами паливних елементів. Ще одним ключем до розкриття потенціалу водневої авіації є розвиток необхідної інфраструктури дозаправки. Більшість необхідних технологій сьогодні є комерційно доступними, тому проблема полягає в основному в масштабуванні та будівництві паралельних інфраструктур під час переходу на нові авіаційні системи. Тим не менш, деякі критичні проблеми інженерного-дослідницького характеру повинні бути вирішені. Результат вирішення цих проблем може «підтримати або зламати» конкурентоспроможність водневої авіації.

Зведемо до таблиць проблеми технологій акумулювання та використання водню на борту літака та в інфраструктурі аеропортів, що є актуальними на сьогодні.

Таблиця 2 - Аналіз компонентів системи акумулювання та використання водню на борту літака [25-30]

№ з/п	Системи технологій	Технологічні параметри, існуючі на даний момент	Необхідні технологічні параметри	Пріоритет подальших інновацій
1	Бортові компоненти та система розподілу зрідженого водню	не існує єдиної розробки стандартів для комерційних літаків	Безпечна, сертифікована архітектура розподілу з мінімальною вагою та витратами на технічне обслуговування	Безпека та надійність для розподілу зрідженого водню на рівні загально вживаного палива, наприклад, керосину
2	Високопотужна система паливних елементів, включаючи концепції охолодження водню	~0,75 кВт/кг щільність потужності на системному рівні; Найбільш просунутими і придатними для авіації сьогодні є низькотемпературні протоніообмінні мембранні (ПЕМ) паливні елементи; Гібридна система водневих турбін і систем паливних елементів.	1,7 кВт/кг для регіональних літаків (<5 МВт), 2 кВт/кг для літаків малої дальності та великих літаків; Зріджений водень вимагає криогенного охолодження до 20 градусів Кельвіна. Ці температури повинні підтримуватися трубами, клапанами і компресорами; Необхідно підтримувати на низькому рівні кипіння, а також уникати витоків та тріскання матеріалу	Підтримання пріоритетності використання паливних комірок, оскільки вони мають більш високий потенціал для зменшення впливу на клімат, ніж спалювання водню.

Продовження таблиці 2

3	Легкі та безпечні баки для зрідженого водню	гравіметричний індекс складає 15-20% (для бака з менш ніж однією тонною зрідженого водню)	35% -гравіметричний показник для малої дальності (5 тонн зрідженого водню), 38%+ для літаків дальнього польоту (понад 30 тонн зрідженого водню); Оскільки зріджений водень повинен залишатися холодним, а тепловіддача повинна бути зведена до мінімуму, щоб уникнути випаровування водню, сферичні або циліндричні резервуари необхідні для підтримки низьких втрат.	Зменшення ваги баків для зрідженого водню, щоб забезпечити більш ефективний літак з водневим двигуном і покращеними економічними параметрами, що потенційно підвищує конкурентоспроможність для літаків дальнього польоту.
---	---	---	--	--

Таблиця 3 - Аналіз компонентів системи зберігання та транспортування водню в інфраструктурі аеропортів [25-30]

КОМПОНЕНТИ СИСТЕМИ ЗБЕРІГАННЯ ТА ТРАНСПОРТУВАННЯ ВОДНЮ В ІНФРАСТРУКТУРІ АЕРОПОРТІВ				
ІННОВАЦІЙНІ СИСТЕМИ ТЕХНОЛОГІЙ	Ефективні системи заправки	Налаштування дозаправки аеропортів і літаків	Інфраструктура заправки гідранту зрідженого водню	Танкери для зберігання водню в рідкому аміаку та/або рідких органічних носіях
Цілі подальших інновацій	Скоротити час заправки зрідженим воднем, щоб звести до мінімуму вплив на час загального обсягу заправок	Розробити інфраструктуру дозаправки з мінімальними перебоями в поточних операціях аеропорту	Визначити, чи є інфраструктура заправки гідранта зрідженого водню економічно та технічно можливою і може забезпечити економію масштабу у великих аеропортах.	
Технології та технологічні параметри, існуючі на сьогодні	~ 500 літрів за хвилину	Модульна капсульна технологія компанії Universal Hydrogen; Заправні вантажівки призначені для міжміських перевезень	Непомірні витрати, які в 5 разів більше стандартних гідрантних систем	-зберігання під тиском -зберігання в якості рідини
Необхідні параметри	>1,000 літрів за хвилину	Концепція заправки вантажівок повністю повинна бути оптимізована для дозаправки в аеропортах до 2030 року; масштабна модульна заправка, здатна працювати паралельно з існуючою інфраструктурою заправки в аеропортах - до 2035 року	Гідрантна система заправки повинна коштувати нарівні з заправними вантажівками	

Висновки. Переваги водню як універсального енергоносія прийнято визначати екологічною чистотою, гнучкістю і ефективністю процесів перетворення енергії з його участю. Технології різномасштабного виробництва водню досить добре освоєні і мають практично необмежену сировинну базу. На даний момент найбільш відомим і добре дослідженим методом виробництва чистого водню (до 99,9%) є електроліз води.

Проаналізувавши усі можливі способи зберігання водню, можна твердо сказати, що його зберігання є цілком безпечним. Якщо зберігати водень у газоподібному стані, то даний спосіб зберігання є добре розвиненим і доступним у ціні. У випадку зберігання рідкого водню присутні високі енергозатрати на його зрідження, через це спосіб є дорогим у реалізації. Технологія зберігання в нанотрубках, вуглецевих наноструктурах та фулеренах є перспективним у майбутньому, проте зараз ще знаходиться на стадіях реалізації та вдосконалення. Гібридна система зберігання водню має значні переваги над іншими з точки зору техніки безпеки, через це висока вартість такого зберігання.

Отже, є потенціал для його розширення. До переваг використання водню як моторного палива відносяться: високий ККД, низька токсичність, безшумність; різноманіття первинних видів палива, широкий інтервал потужності.

Використання відновлюваних джерел енергії в транспорті повинно бути продовжено і посилено, підкріплене політикою, заснованою на існуючих стратегіях, які повинні бути додатково розроблені для зміцнення уваги до електроенергії та водню на транспорті. Було б вигідно розробити національну стратегію та національну програму академічного та промислового розвитку водневої енергетики та паливних елементів в Україні.

Авіаційна промисловість повинна зробити радикальні зрушення, якщо вона хоче зменшити свій вплив на клімат. Широкий спектр технологічних інновацій знаходиться в стадії розробки для підвищення паливної ефективності літаків і скорочення викидів двоокису вуглецю. Водневий двигун може значно зменшити вплив авіації на клімат. Водень усуває викиди двоокису вуглецю в польоті і може бути вироблений без вуглецю. Для масштабування літаків з таким двигуном необхідно провести кілька технологічних інновацій: підвищення загальної ефективності за допомогою більш легких паливних баків (орієнтація на 12 кВт/кг, гравіметричний індекс 35%) і систем паливних комірок (приблизно 2 кВт/кг, у т.ч. охолодження), розподілу рідкого водню всередині літака, турбін, здатних спалювати водень з низькими викидами оксиду азоту, а також розробки ефективних технологій заправки, що дозволяють розвивати швидкість потоку, порівнянну з керосином. Експерти галузі прогнозують, що ці важливі досягнення можливі протягом наступних п'яти-десяти років.

Список використаної літератури

1. Р. В. Радченко, А. С. Мокрушин, В. В. Тюльпа. Водород в энергетике: учеб. пособие / Р. В. Радченко, А.С. Мокрушин, В. В. Тюльпа. – Екатеринбург: Изд-во Урал.ун-та, 2014. –С. 20.
2. Степанов А.В., Кухарь В.П. Достижения энергетике и защита окружающей среды. — Киев: Наук.думка, 2004. — 206 с.
3. Гольцов В. Воднева цивілізація майбутнього / В. Гольцов // Науковий світ. - 2008. - № 4. - С. 2-5.
4. Дерзский В. Г. Исландский проект / В.Г. Дерзский // Энергетика и электрификация. - 2002. - № 10. - С. 45-46.
5. Н. Грінвуд, А. Ерншо. Хімія елементів: у 2-ох томах. – БІНОМ. Лабораторія знань, 2008. – Т.1. – С.11. — ISBN 978-5-94774-373-9.
6. Ковтун Г. Перспективи водневої енергетики / Г. Ковтун, Є. Полункін /Вісник Національної Академії Наук України. - 2007. - № 4. - С. 12-18.
7. Физическая энциклопедия. В 5 т. / главн. ред. А. М. Прохоров. М. : Советская энциклопедия. Главный редактор А. М. Прохоров. 1988.-С. 16.
8. Аналіз ефективності використання енергетичних ресурсів. В.С. Кудлай, Л.С.Селіверстов, 2012. - С. 4-5.
9. Атжанов Р. Разворот на водород / Р. Атжанов // Вокруг света. - 2006. - № 7.-С. 104-111.
10. Арцимович Л. А. Управляемые термоядерные реакции / Л. А. Арцимович. 2 изд., М., 1963. – С. 67.
11. Ефремов И. В. На пути к термоядерному реактору / И. В. Ефремов. М. :, 1993. – С. 81.
12. Мордков В.З. Материалы Международного форума по водородным технологиям для производства энергии (6—10 февраля 2006 г.). — М.:РУСДЕМ Энергоэффект, 2006. — 122 с.
13. Электролиз, или вода вместо бензина. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.skyzone.ru/tech/meyer_h2.htm.
14. Ковтун Г. Паливний елемент - основа водневої енергетики / Г. Ковтун //Вісник Національної Академії Наук України. - 2006. - № 3. - С. 78-83
15. Водород. Свойства, получение, хранение, транспортирование, применение: справочник. М. : Химия, 1989. – С. 112.

16. Воднева економіка та паливні комірки. //Громадська Рада України, - 2005.
17. Варшавский И.Л., Мищенко А.И. Анализ работы поршневого двигателя на водороде. Известия вузов № 10. – М.: Машиностроение, 1977. – с.110-114.
18. Crabtree, G.W.; Dresselhaus, M.S.; Buchanan, M.V. The Hydrogen Economy. Phys. Today 2004, 57, 39–45
19. Sap, K.A.; Demmers, J.A.A.; Nimit Patel, G.R. The energy efficiency of onboard hydrogen storage. Intech 2012, 6, 111–133.
20. J.E. Allen, Global energy issues affecting aeronautics: a reasoned conjecture, Progress in Aerospace Sciences 35 (5) (1999) 413–453.]
21. EIA, Official Energy Statistics from the US Government, Energy Information Administration, 2009 (accessed January 20, 2009) <http://www.eia.doe.gov>.
22. WAEG, World Energy Consumption and Production Trends, 2005, World Almanac Education Group, New York, 2008.]
23. M.M. Abu-Khader, Recent advances in nuclear power: a review, Progress in Nuclear Energy 51 (2) (2009) 225–235.]
24. K. Gregory, H.-H. Rogner, Energy resources and conversion technologies for the 21st century, Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change 3 (2) (1998) 171–230.]
25. Hydrogen powered aviation report 2020, Clean Sky 2 JU & FCH 2 JU, p.20
26. IATA Publications, 2018
27. Balancing growth in connectivity with a comprehensive global air transport response to the climate emergency, ATAG Waypoint 2050 Report
28. A Study on Electrofuels in Aviation, Andreas Goldmann/Energies, MDPI
29. Aircraft Technology Roadmap to 2050, IATA
30. E- E-fuels: towards a more sustainable future for truck transport, shipping and aviation, VoltaChem whitepaper, 2020

S. Boichenko, Dr. Sc. Sciences, Prof., ORCID 0000-0002-2489-4980

National Technical University of Ukraine

"Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky"

I. Shkilniuk, Dr. Sc. Sciences, ORCID 0000-0002-8808-3570

National Aviation University

O. Tselishchev, Ph.D. tech. Sciences, ORCID 0000-0002-5758-2908

East Ukrainian National University named after V. Dahl

I. Matviyi, ORCID 0000-0003-3989-2651

National Aviation University

O. Tarasiuk, ORCID 0000-0001-6697-1078

Institute for Circular and Hydrogen Economy

Artur Jaworski, ORCID 0000-0002-1599-1711

Pawel Wos, ORCID 0000-0003-2730-3258

Rzeszów University of Technology, Rzeszów, Poland

MODERN TECHNOLOGIES OF HYDROGEN GENERATION AND ACCUMULATION. ANALYTIC OVERVIEW OF THEORETICAL AND PRACTICAL EXPERIENCE

The article discusses the competitiveness of alternative fuels and technologies in the rapidly growing segment of passenger vehicles and aviation, which globally consumes more than 70% of the fuel spent on passenger transportation and about 45% in total on transport. The emergence of new technologies in personal vehicles (electric vehicles, hydrogen cars with fuel cell, biofuels, natural gas, etc.) makes us look at the prospects for the development of this segment in a new way. On the basis of this approach, an assessment of the methods of hydrogen production was carried out. Hydrogen production by steam conversion of methane, water electrolysis and biochemical production methods were compared in this article.

Hydrogen is not a source of energy, but it is a mean of converting other energy sources into chemical energy in the form of accumulative pure hydrogen, which can be used subsequently during its oxygenation. In fact, a tank or other hydrogen storage device is technically similar to a battery or gas tank, and therefore it is necessary to compare not only the efficiency, but also other parameters. Hydrogen needs to be produced and converted to produce final energy, and both require energy.

The advantages of hydrogen as a universal energy carrier are determined by environmental purity, flexibility and efficiency of energy conversion processes with its participation. Technologies of large-scale hydrogen production are quite well mastered and have an almost unlimited raw material base.

The importance of hydrogen production technologies is determined by the high calorific value of hydrogen combustion and the possibility of reducing greenhouse gas emissions, since ordinary water is the combustion product.

The article provides a comparative analysis of methods of hydrogen storage in liquid and gaseous states, carbon structures and hydride of metals

Keywords: hydrogen, motor fuel, hydrogen energy, hydrogen potential, fuel cell, hydrogen production, hydrogen storage methods, hydrogen engine.

References

1. R. V. Radchenko, A. S. Mokrushy`n, V. V. Tyul`pa. Vodorod v `nergety`ke : ucheb.posoby`e / R. V. Radchenko, A.S. Mokrushy`n, V. V. Tyul`pa. —Ekateri`nburg : Y`zd-vo Ural.un-ta, 2014.-C.20.
2. Stepanov A.V., Kuxar` V.P. Dosty`zheny`ya `nergety`ky` y` zashhy`ta okruzhayushhej sredy. — Ky`ev: Nauk.dumka, 2004. — 206 s.
3. Gol`czov V. Vodneva cy`vilizaciya majbutn`ogo / V. Gol`czov // Naukovy`j svit. - 2008. - # 4. - S. 2-5.
4. Derzsky`j V. G. Y`slandsky`j proekt / V.G. Derzsky`j // `Energety`ka y` `elektry`fy`kacy`ya. - 2002. - # 10. - S. 45-46.
5. N. Grinvud, A. Ernsho. Ximiya elementiv: u 2-ox tomax. – BINOM. Laboratoriya znan`, 2008. – T.1. – S.11. — ISBN 978-5-94774-373-9.
6. Kovtun G. Perspekti`vy` vodnevoyi energety`ky` / G. Kovtun, Ye. Polunkin /Visny`k Nacional`noyi Akademiyi Nauk Ukrayiny`. - 2007. - # 4. - S. 12-18.
7. Fy`zy`cheskaya `ency`klopedy`ya. V 5 t. / glav. red. A. M. Proxorov. M. : Sovetskaya `ency`klopedy`ya. Glavnyj redaktor A. M. Proxorov. 1988.-C. 16.
8. Analiz efekty`vnosti vy`kory`stannya energety`chny`x resursiv. V.S. Kudlaj, L.S.Seliverstov, 2012. - C. 4-5.
9. Atzhanov R. Razvorot na vodorod / R. Atzhanov // Vokrug sveta. - 2006. - # 7.-S. 104-111.
10. Arcy`movy`ch L. A. Upravlyаемые termoyadernye reakcy`y` / L. A. Arcy`movy`ch. 2 y`zd., M., 1963. – C. 67.
11. Efremov Y. V. Na puty` k termoyadernomu reaktoru / Y. V. Efremov. M. :, 1993. – C. 81.
12. Mordkov V.Z. Matery`aly Mezhdunarodnogo foruma po vodorodnym texnologiy`yam dlya proizvodstva energy`y` (6—10 fevralya 2006 g.). — M.:RUSDEM Energoeffekt, 2006. — 122 s.
13. Elektrolyz, yly voda vmesto benzyna. [`Elektronnyj resurs]. Rezhym dostupa: http://www.skyzone.ru/tech/meyer_h2.htm.
14. Kovtun G. Paly`vny`j element - osnova vodnevoyi energety`ky` / G. Kovtun //Visny`k Nacional`noyi Akademiyi Nauk Ukrayiny. - 2006. - # 3. - S. 78-83
15. Vodorod. Svoystva, polucheny`e, xraneny`e, transporty`rovany`e, pry`meneny`e: spravochny`k. M. : Xy`my`ya, 1989. – C. 112.
16. Vodneva ekonomika ta paly`vni komirky`. //Gromads`ka Rada Ukrayiny`, - 2005.
17. Varshavsky`j Y`.L., My`shhenko A.Y`. Analiz raboty porshnevoogo dvygatelya na vodorode. Yzvesty`ya vuzov # 10. – M.: Mashynostroeny`e, 1977. – s.110-114.
18. Crabtree, G.W.; Dresselhaus, M.S.; Buchanan, M.V. The Hydrogen Economy. Phys. Today 2004, 57, 39–45
19. Sap, K.A.; Demmers, J.A.A.; Nimit Patel, G.R.The energy efficiency of onboard hydrogen storage. Intech6 2012, 6, 111–133.
20. J.E. Allen, Global energy issues affecting aeronautics: a reasoned conjecture, Progress in Aerospace Sciences 35 (5) (1999) 413–453.]
21. EIA, Official Energy Statistics from the US Government, Energy Information Administration, 2009 (accessed January 20, 2009) <http://www.eia.doe.gov.>,
22. WAEG, World Energy Consumption and Production Trends, 2005, World Almanac Education Group, New York, 2008.]
23. M.M. Abu-Khader, Recent advances in nuclear power: a review, Progress in Nuclear Energy 51 (2) (2009) 225–235.].
24. K. Gregory, H.-H. Rogner, Energy resources and conversion technologies for the 21st century, Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change 3 (2) (1998) 171–230.].
25. Hydrogen powered aviation report 2020, Clean Sky 2 JU & FCH 2 JU, p.20
26. IATA Publications, 2018
27. Balancing growth in connectivity with a comprehensive global air transport response to the climate emergency, ATAG Waypoint 2050 Report
28. A Study on Electrofuels in Aviation, Andreas Goldmann/Energies, MDPI
29. Aircraft Technology Roadmap to 2050, IATA
30. E- E-fuels: towards a more sustainable future for truck transport, shipping and aviation, VoltaChem whitepaper, 2020

Надійшла 01.02.2022

Received 01.02.2022