

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет магістерської та
аспірантської підготовки
Кафедра екологічного права і контролю

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

рівень вищої освіти: «магістр»

на тему: «Екологічні аспекти водневої енергетики»

Виконав: студент 2 курсу, групи МЕК - 65
Спеціальності 8.04010604 «Екологічний
контроль та аудит»

Рибчинський Леонід Миколайович

Керівник к.геогр.н., доц.

Бургаз Олексій Анатолійович

Рецензент к.х.н., доц.

Шаніна Тетяна Петрівна

Одеса - 2017

АНОТАЦІЯ

З 1900 по 2000 р. споживання енергії в світі збільшилося майже в 15 разів. В якості первинних джерел використовуються нафтопродукти, вугілля, природний газ, ядерне паливо і поновлювані джерела. Використання викопного палива призвело до того, що викиди вуглекислого газу в атмосферу зросли в 4,5 рази.

Водень є одним з перспективних екологічно чистих джерел енергії. Він може знайти ширше застосування у транспорті, металургії, в електроенергетиці, хімічній промисловості, житлово-комунальному господарстві та інших галузях. Воднева енергетика розглядається багатьма фахівцями саме як засіб досягнення завдань глобальної енергетичної революції.

Головними перевагами водню разом з екологічністю є практично невичерпна ресурсна база для його одержання та можливість універсального використання.

Об'єктом дослідження є воднева енергетика.

Предметом дослідження є огляд впливу водневої енергетики на стан навколишнього природного середовища.

Магістерська кваліфікаційна робота складається з анотації, вступу, трьох розділів, висновків, та списку літератури. Загальний обсяг роботи складає 63 сторінки.

Ключові слова: воднева енергетика, паливний елемент, вплив на довкілля.

ANNOTATION

From 1900 to 2000 energy consumption in the world increased by nearly 15 times. As the primary source used oil, coal, natural gas, nuclear fuel and renewable sources. The use of fossil fuels has led to emissions of carbon dioxide in the atmosphere increased by 4,5 times.

Hydrogen is a promising clean energy. He may find wider application in the transport industry, the power industry, chemical industry, housing and other industries. Hydrogen energy is considered by many experts as a means of achieving the objectives of the global energy revolution.

The main advantages of hydrogen with low emissions are virtually inexhaustible resource base for its reception and the possibility of universal use.

Object of study is hydrogen energy.

The subject of study is to review the impact of hydrogen energy in the state of the environment.

Master's qualification work consists of abstract, introduction, three chapters, conclusions and list of references. Total volume of work is 63 pages.

Keywords: hydrogen energy, fuel cell, the impact on the environment.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	7
ВСТУП	8
1 ТЕХНІЧНІ АСПЕКТИ ВОДНЕВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ.....	11
1.1 Отримання водню	11
1.2 Виготовлення паливних елементів.....	16
2 РІВЕНЬ ВПРОВАДЖЕННЯ ВОДНЕВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ В КРАЇНАХ СВІТУ	24
2.1 Воднева енергетика як галузь майбутнього	24
2.2 Переваги та недоліки водневої енергетики	30
2.3 Розвиток водневої енергетики у світі	34
2.4 Впровадження водневої енергетики в Україні.....	38
3 ВПЛИВ ВОДНЕВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ НА НАВКОЛИШНЄ ПРИРОДНЕ СЕРЕДОВИЩЕ	45
3.1 Вплив на атмосферне повітря	52
3.2 Вплив на ґрунти та водні ресурси	55
ВИСНОВКИ.....	57
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	60

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АЕС – атомна електростанція;

ВЕС – вітрова електростанція;

ВТГР – високотемпературний гелієвий реактор;

ВТЕ – високотемпературний електроліз;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

НАНУ – Національна академія наук України;

НВДЕ – нетрадиційні відновлювані джерела енергії;

ПЕ – паливний елемент;

ТППЕ – твердо полімерний паливний елемент;

ЯПЦ – ядерний паливний цикл.

ВСТУП

З 1900 по 2000 р. споживання енергії в світі збільшилося майже в 15 разів – з 21 до 320 екоДж (1 екоДж = $27 \times 10^6 \text{ м}^3$ нафти). В якості первинних джерел використовуються нафтопродукти (34.9%), вугілля (23.5%), природний газ (21.1%), ядерне паливо (6.8%) і поновлювані джерела – вітер, сонце, гідро- і біопаливо (13.7%) [1]. Це призвело до того, що за 50 років викиди вуглекислого газу в атмосферу зросли в 4.5 рази і сьогодні становлять $20 \times 10^{12} \text{ м}^3/\text{год}$. Це той самий вуглекислий газ, заради якого існує Кіотський протокол і який, як запевняють багато вчених, викликає ефект. Взагалі енергетика, заснована на викопному паливі, створює дуже багато екологічних проблем. Виникає дилема: без енергії не можна зберегти нашу цивілізацію, однак існуючі методи виробництва енергії і високі темпи зростання її споживання призводять до руйнування навколишнього середовища. Природно, що одна з основних завдань сучасної енергетики – пошуки шляхів подолання екологічних проблем.

Друга і, напевно, головна проблема полягає в тому, що існуючі джерела енергії обмежені. Вважається, що нафти та газу вистачить не більше ніж на 100 років, вугілля – приблизно на 400 років, ядерного палива - на 1000 років з гаком. Для того щоб мати паливо, коли на Землі будуть вичерпані запаси нафти і газу, і вирішити екологічні проблеми, необхідно переходити до нових джерел енергії і мати «чисту енергетику». І наша головна надія – на водневу енергетику: використання водню як основного енергоносія та паливних елементів як генераторів електроенергії. Одночасно різко скоротиться споживання викопних палив, тому що водень можна отримувати з води, розкладаючи її на водень і кисень. Енергію для цього будуть давати ядерна енергетика і поновлювані джерела.

Перехід на водневу енергетику означає великомасштабне виробництво водню, його зберігання, розподіл (зокрема, транспортування) і використання для вироблення енергії за допомогою паливних елементів. Водень знаходить застосування і в інших областях, таких як металургія, органічний синтез, хімічна і харчова промисловість, транспорт і т.д. Судячи за сучасними темпами і масштабами розвитку водневої енергетики на нашій планеті, світова цивілізація найближчим часом має перейти до водневої економіки. Фактично завдання полягає в тому, щоб створити паливні елементи і використовувати водень для отримання електричної енергії.

Загострення проблеми охорони довкілля на фоні зростаючого попиту на паливо та енергію спонукає світову спільноту до ефективного пошуку нових енергетичних технологій, які б забезпечували прийнятний рівень забруднення і одночасно не уповільнювали економічного зростання. Ключове місце в розв'язанні цієї проблеми, на думку багатьох фахівців, займе воднева енергетика – виробництво водню і його використання на основі паливних елементів в промисловості, будівництві, енергетиці, на транспорті, в житлово-комунальному господарстві й інших сферах економіки.

Енергетичні об'єкти (паливно-енергетичний комплекс взагалі і об'єкти енергетики зокрема) за ступенем впливу на навколишнє середовище належать до числа найбільш інтенсивно впливають на біосферу.

Збільшення напорів і обсягів водосховищ гідровузлів, продовження використання традиційних видів палива (вугілля, нафта, газ), будівництво АЕС та інших підприємств ядерного паливного циклу (ЯПЦ) висувають ряд принципово важливих завдань глобального характеру за оцінкою впливу енергетики на біосферу Землі. Якщо в попередні періоди вибір способів отримання електричної та теплової енергії, шляхів комплексного вирішення проблем енергетики, водного господарства, транспорту та ін. і призначення основних параметрів об'єктів (тип і потужність станції, об'єм водосховища та ін.) проводилися в першу чергу на основі мінімізації економічних витрат,

то в даний час на перший план все більше висуваються питання оцінки можливих наслідків зведення та експлуатації об'єктів енергетики.

Це, перш за все, відноситься до ядерної енергетики (АЕС і інші підприємства ЯПЦ), великим гідровузлах, енергокомплексу, підприємствам, пов'язаним з видобутком і транспортуванням нафти і газу і т.п. Тенденції та темпи розвитку енергетики зараз в значній мірі визначаються рівнем надійності та безпеки (в тому числі екологічної) електростанцій різного типу. До цих аспектів розвитку енергетики привернуто увагу фахівців та широкої громадськості, вкладаються значні матеріальні та інтелектуальні ресурси, однак сама концепція надійності і безпеки потенційно небезпечних об'єктів інженерних залишається багато в чому мало розробленою.

Розвиток енергетичного виробництва, мабуть, слід розглядати як один з аспектів сучасного етапу розвитку техносфери взагалі (і енергетики зокрема) і враховувати при розробці методів оцінки і засобів забезпечення надійності та екологічної безпеки найбільш потенційно небезпечних технологій.

Одне з найважливіших напрямів розв'язання даної проблеми – прийняття комплексу технічних і організаційних рішень на основі концепцій теорії ризику.

Метою моєї магістерської роботи є аналіз впливу водневої енергетики на стан навколишнього природного середовища.

1 ТЕХНІЧНІ АСПЕКТИ ВОДНЕВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

1.1 Отримання водню

Серед альтернативних палив при сучасному рівні знань найбільш перспективним є водень, який має великі потенційні можливості використання. Він вносить значний вклад у вирішення трьох найбільш важливих завдань, що стосуються використання енергії: зниження емісії парникових газів, підвищення енергетичної безпеки та зниження забруднення повітря.

Водень є найпоширенішим елементом у Всесвіті (93% (ат.) і одним з найпоширеніших на Землі (15,52% (ат.%)). Основним джерелом водню на Землі є вода і органічні сполуки, включаючи нафту, природний газ і біомасу [1, 2]. Він є в надлишку і поширений в світі без урахування національних кордонів.

У природі водень у вільному стані не зустрічається і, таким чином, не є прямим джерелом енергії, а подібно електрики, є енергоносієм. Але на відміну від електрики, яке є носієм електронів, водень є джерелом хімічної енергії і потенційно більш ефективний як засіб накопичення енергії, особливо при використанні в з відновлюваною енергією, таких як енергія сонця і вітру.

Сьогодні водень отримують головним чином (90 %) з викопних джерел [3]. Зв'язок централізованого виробництва з депо малотоннажних автомобілів на паливних елементах потребуватиме розміщення та будівництва розподільчої інфраструктури з великим вкладенням капіталу. Одне з завдань водневої енергетики – забезпечення компактного та безпечного зберігання водню на борту транспортного засобу, з метою подовжити інтервал між заправками.

На Землі у звичайних природних умовах молекулярний водень майже не зустрічається. Більшість водню на Землі зв'язана з киснем у воді. Виробництво елементарного водню вимагає переробки носія водню, наприклад, викопного палива і води. Витрачаються викопні ресурси та виділяється вуглекислий газ, але найчастіше подальший вклад енергії, крім викопного палива, уже не потрібний. Розкладання води вимагає витрат електроенергії або тепла, одержаного з будь-якого первинного джерела енергії (спалення викопного палива, атомної енергії або відновлюваних джерел енергії).

У промисловості водень виробляється через перетворення пари, з використанням викопних видів палива, наприклад, природного газу, нафти чи вугілля [4]. Енергоємність виробленого водню менше, ніж енергія, що міститься у вихідному паливі, але завдяки високому ККД паливних елементів вона може бути використана повніше, ніж при безпосередньому використанні вихідного палива. Внаслідок перетворення вихідного палива в атмосферу може викидатися вуглекислий газ, так само, як внаслідок роботи двигуна автомобіля. Але завдяки високому ККД паливних елементів його кількість може бути меншою, ніж при використанні палива безпосередньо.

Невелика частина водню (близько 4 %) отримується шляхом електролізу води. Для одержання кілограму водню таким шляхом необхідно витратити приблизно 50 кіловат-годин електроенергії.

Кварнер-процес або кварнер сажі та водню (СВ & Н) – це метод, розроблений в 1980-х роках однойменною норвезькою компанією для виробництва водню з вуглеводнів, наприклад, з метану, природного газу і біогазу [5]. Розподіл енергії у речовині під час процесу приблизно такий: близько 48 % енергії міститься в атомі водню, 40 % – у вуглеці та 10 % – у перегрітій парі.

Ферментативне виробництво водню – це ферментативне перетворення органічного субстрату в біоводень, що здійснюється групою бактерій за допомогою мультиферментативних систем в три кроки, аналогічно до

анаеробного перетворення. Темнова ферментація не потребує світлової енергії, тому можливе неперервне виробництво водню з органічних сполук – вдень і вночі. Фотоферментація відрізняється від темної ферментації тим, що вона протікає лише за наявності світла. Наприклад, фотоферментація з *Rhodobacter sphaeroides* SH_2C може бути використана для перетворення нижчих жирних кислот у водень. Електрогідrogenезис використовується в мікробних паливних елементах, де водень виробляється з органічних речовин (наприклад, зі стічних вод або твердих речовин) при напрузі 0,2 – 0,8 V.

Біоводень може вироблятися у біореакторі, що містить водорості. Наприкінці 1990-х років було виявлено, що якщо з водоростей вилучити сульфур, вони вироблятимуть водень замість кисню, як під час звичайного фотосинтезу.

Біоводень може вироблятися в біореакторах, які використовують іншу сировину, найчастіше цією сировиною є відходи. Цей процес здійснюється бактеріями, що поглинають вуглеводні та виділяють водень і вуглекислий газ. Є кілька способів подальшого ізолювання CO_2 , в результаті чого залишається лише водень. Прототип водневого біореактору на відходах введено в експлуатацію на заводі виноградних соків Уелч у США, штат Пенсільванія.

Крім звичайного електролізу, можливий також електроліз з використанням мікробів. При електролізі з біокатализаторами водень утворюється внаслідок проходження через мікробний паливний елемент, також можуть використовуватись різноманітні водні рослини. До них відносяться родини *Glyceria*, *Spartina*, рис, помідори, люпин, водорості.

Водень може вироблятися електролізом за високого тиску або електролізом води за низького тиску. У сучасних ринкових умовах 50 кВт / год електроенергії, витраченої на виробництво одного кілограма стисненого водню, коштують приблизно стільки ж, скільки водень, вироблений за 8 центів/kWh. Ціновий еквівалент пояснюється тим, що більшість водню виробляється з викопних видів палива, які ефективніше використовувати для

виробництва хімічного продукту безпосередньо, ніж для виробництва електроенергії і подальшого електролізу. Так чи інакше, головним завданням водневої енергетики є отримання водню з інших джерел, тож в майбутньому планується не використовувати викопне паливо як сировину.

Електроліз за високого тиску – це електроліз води, при якому вода (H_2O) розкладається на кисень (O_2) і водень (H_2), внаслідок пропускання електричного струму через воду. Різниця між таким електролізером і звичайним, полягає у тому, що водень виводиться під тиском близько 120-200 бар. При стисканні водню в електролізаторі потреба у зовнішньому компресорі водню зникає, середнє споживання енергії внутрішнім компресором становить близько 3 %.

Водень може бути отриманий в процесі високотемпературного електролізу (ВТЕ), що забезпечується енергією у вигляді тепла та електроенергії. Оскільки частина енергії в ВТЕ – теплова, менша кількість енергії потребує подвійного перетворення (з тепла в електрику, а потім в хімічну форму), тому на виробництво кілограму водню витрачається набагато менше енергії.

В той час як атомна електроенергія може бути використана для електролізу, теплова ядерна енергія може застосовуватись безпосередньо для розщеплення води на кисень і водень. Розігрітий до високих температур (950 – 1000 °C) газ у ядерному реакторі може розкласти воду на кисень і водень термохімічним шляхом через використання ядерної теплової енергії. Дослідження можливостей високотемпературних ядерних реакторів можуть зрештою привести до організації виробництва водню, яке буде конкурентоспроможним з виробництвом, що базується на перетворенні природного газу. General Atomics передбачає, що водень, вироблений у високотемпературному газовому реакторі (ВТГР) коштуватиме \$ 1.53/кг. У 2003 році водень, одержаний переробкою природного газу, коштував \$ 1.40/кг. В перерахунку на вартість природного газу у 2005 році, водень коштує \$ 2.70/кг.

Високотемпературний електроліз проводився в лабораторії, з витратами 108 МДж теплової енергії на кілограм водню, але не в промислових масштабах. Крім того, в результаті цих процесів одержується низькоякісний «промисловий» водень, який є непридатним для використання в паливних елементах.

Найчистішим способом отримання водню є той, що базується на використанні електроенергії, виробленої фотоелектричними системами. Вода розкладається на водень і кисень шляхом електролізу – фотоелектрохімічного процесу, який також називають штучним фотосинтезом. У фотоелектричній промисловості ведуться наукові дослідження, спрямовані на розвиток високоефективної технології мультиперехідних елементів.

Для розкладання води на кисень і водень необхідні дуже високі температури. Щоб процес протікав за нижчих температур, необхідний каталізатор. Нагрівання води може відбуватись за рахунок концентрації сонячної енергії. Hydrosol-2 – це 100 кіловатний експериментальний завод на Plataforma Solar de Almería в Іспанії, який нагріває воду до необхідних 800 – 1200 °С за допомогою сонячного світла. Hydrosol II введений в експлуатацію з 2008 року. Розробка цього 100 кіловатного експериментального заводу базується на модульній концепції. Отже, цілком можливо, що діапазон дії цієї технології буде розширений до мегават шляхом збільшення кількості реакторних блоків і з'єднання заводу з геліостатними полями (поля дзеркал, що автоматично орієнтуються на сонце) відповідного розміру.

Метод, вивчений Томасом Нанном і його командою в Університеті Східної Англії, складається з золотого електрода, вкритого шарами наночасток фосфіду індія (InP). Вони ввели залізо-сірчаний комплекс в шари покриття, внаслідок чого після занурення у воду і опромінення світлом під невеликим електричним струмом, вироблявся водень з ККД 60 %.

Є більш ніж 352 термохімічних цикла, які можуть використовуватись для розкладання води. Близько десятка з них (наприклад, цикл оксиду заліза,

цикл церій (IV) — церій (III) оксид, цикл цинк — цинк-оксид, сульфур-йодний цикл, мідно-хлорний і гібридний сульфурний цикл) зараз досліджуються і знаходяться на фазі випробування з метою одержання водню і кисню з води за допомогою теплової енергії та без використання електрики [6]. Ці процеси можуть бути ефективнішими, ніж електроліз за високих температур, діапазоні ефективності від 35 % – 49 % LHV. Термохімічне виробництво водню з використанням хімічної енергії вугілля або природного газу, як правило, не розглядається, бо безпосередньо хімічний спосіб є ефективнішим.

Жоден з термохімічних процесів виробництва водню не був використаний на промисловому рівні, хоча деякі з них були продемонстровані в лабораторії.

Особливий інтерес водень викликає як багатообіцяюче паливо майбутнього, так як є найлегшим паливом з найбільшою енергією на одиницю маси, яке легко може бути перетворено в хімічну, механічну або електричну енергію.

До теперішнього часу в світі склалася думка, що завдяки необмеженим ресурсам, високій енергонасиченості, технологічній гнучкості і екологічній чистоті процесів перетворення енергії з участю водню, його слід розглядати як найбільш перспективний енергоносіє майбутнього.

1.2 Виготовлення паливних елементів

Ідея енергосистем на основі водню була сформульована вже після нафтової кризи 1970-х рр. Але особливо зріс інтерес до водню після створення паливних елементів (ПЕ) з полімерною мембраною на основі сульфовані полістиролу. З цього моменту почалася інтенсивна розробка твердополімерних паливних елементів (ТППЕ) і створення полімерних мембран.

Перехід на водневу енергетику означає великомасштабне виробництво водню, його зберігання, розподіл (зокрема, транспортування) і використання для вироблення енергії за допомогою паливних елементів. Водень знаходить застосування і в інших областях, таких як металургія, органічний синтез, хімічна і харчова промисловість, транспорт і т.д. Судячи за сучасними темпами і масштабами розвитку водневої енергетики на нашій планеті, світова цивілізація найближчим часом має перейти до водневої економіки. Фактично завдання полягає в тому, щоб створити паливні елементи і використовувати водень для отримання електричної енергії.

ПЕ і створені на їх основі енергоустановки мають цілу низку переваг в порівнянні з тепловими генераторами:

- можливість зниження шкідливих викидів більш ніж на порядок;
- високий ККД перетворення палива в електрику (аж до 90%);
- безшумність роботи;
- можливість використання різних видів палива [7].

Паливні елементи – це гальванічна комірка, що виробляє електроенергію за рахунок окислювально-відновних перетворень реагентів, що надходять ззовні. При роботі паливного елемента електроліт і електроди не витрачаються, не зазнають будь-яких змін. У ньому хімічна енергія палива безпосередньо перетворюється в електроенергію. Дуже важливо, що немає перетворення хімічної енергії палива в теплову і механічну, як у традиційній енергетиці. При спалюванні газу, мазуту чи вугілля в котлі нагрівається пар, який під високим тиском надходить у турбіну, а турбіна вже обертає електрогенератор.

У найпростішому паливному елементі, де використовуються чистий водень і чистий кисень, на аноді відбувається розкладання водню і його іонізація. З молекули водню утворюються два іони водню і два електрони. На катоді водень з'єднується з киснем і виникає вода. Фактично в цьому і полягає головний екологічний вигравш: в атмосферу викидається водяна пара

замість величезної кількості вуглекислого газу, що утворюється при роботі традиційних теплових електростанцій.

Перша електрична енергія була отримана за допомогою паливного елемента ще в 1839 р. Проте бум навколо водневої енергетики виник тоді, коли почалося освоєння космосу. У 60-ті роки минулого століття були створені паливні елементи потужністю до 1 кВт для програм «Джеміні» і «Аполлон», в 70-80-ті роки - 10-кіловатні паливні елементи для «Шаттл». У ті ж роки були побудовані електростанції потужністю близько 100 кВт на фосфорнокислотних паливних елементах. У Японії і США є дослідні 10-мегаватні електростанції.

З 1990-х років і по теперішній час йде розробка паливних елементів потужністю від 1 кВт до 1 МВт для стаціонарної автономної енергетики. Потрібно мати на увазі, що і в автотранспорті знаходять застосування паливні елементи, а в якості їх навантаження – електричні двигуни. Крім того, зараз розробляються портативні джерела електроенергії (потужність менше 100 Вт) для комп'ютерів, стільникових телефонів, фотоапаратів. В якості палива в них використовується, як правило, метанол, з якого отримують водень. Підзарядка елементів проводиться лише один раз на місяць.

Паливний елемент складається з іонного провідника (електроліту) і двох електронних провідників (електродів), що знаходяться в контакт з електролітом. Паливо та окислювач безперервно підводяться до електродів - аноду та катоду, продукти (інертні компоненти й залишки окислювача, а також продукти окислення) безперервно відводяться від них. Основні типи паливних елементів наведені у таблиці 1.1 За типом електроліту вони класифікуються на лужні, твердо-полімерні, фосфорнокислі, розплавкарбонатні і твердооксидні; по робочій температурі - на низько-, середньо- та високотемпературні. Відомо, що використання електродів з палладія і металів платинової групи призводить до підвищення питомих характеристик і збільшення ресурсу паливних елементів. Полімерна

мембрана Nafion, застосовувана в твердополімерних паливних елементах, у США і Канаді виробляється фірмою «Дюпон», у Росії аналогічні мембрани випускає фірма «Пластполімер» [7].

Таблиця 1.2 – Типи паливних елементів та їх параметри [7]

Тип ПЕ	Робоча температура, °С	Електроліт	Паливо	Основні характеристики	КК Д, %	Споживачі
1	2	3	4	5	6	7
ПЕ на протонообмінній мембрані, мають прототипи	< 100	Полімерна мембрана	Водень, метан, метанол, бензин	Потужність – від 1 Вт до 250 кВт вартість - \$1100 – 4000/кВт	40-60	Автомобілі, портативні пристрої
Твердооксидні ПЕ, мають прототипи	500 – 1000	Цирконієва кераміка	Водень, вуглекислий газ, метан	Потужність – від 200 кВт до 400 МВт, вимагає постійного навантаження, вартість - \$700 – 2000/кВт	50-65	Стаціонарні системи електроенергії, теплозабезпечення
ПЕ на основі карбонатів, в стадії демонстрації	600 – 800	Карбонат літію або калію	Водень, оксид вуглецю	Потужність – від 2 до 400 МВт, вимагає постійного навантаження, вартість - \$600 – 1000/кВт	50-60	Стаціонарні системи електроенергії, теплозабезпечення
Кислотні ПЕ	160 – 210	Фосфорна кислота	Водень, вміст оксиду вуглецю або сірки <1-2%	Потужність – від 50 кВт до 400 МВт, вартість - \$1000 – 3000/кВт	40-50	Електрозабезпечення, автобуси
Лужні ПЕ, освоєні в окремих сферах діяльності	50 – 100	Гідроксид калію	Водень	Потужність – від 50 кВт до 100 кВт	45-60	Космічна техніка, підводний флот

Продовження табл. 1.2

1	2	3	4	5	6	7
Метанольні ПЕ, мають прототипи	60 – 130	Полімерна мембрана	Суміш води з метанолом, етанолом	Потужність – < 50 кВт	40	Мініатюрні пристрої, телефони, комп'ютери
Регенеративні ПЕ, в розробці	100 - 120	Замкнута система розкладання води	Вода	Потребує дешевої енергії		Стаціонарні пристрої (в стадії розробки)

У лужних ПЕ в якості електроліту використовується 35% -ний водний розчин лугу (NaOH, KOH). Ці ПЕ працюють при температурі 100 - 120 °С; при роботі з концентрованими розчинами лугів (до 85%) робочі температури можуть бути підвищені до 25 °С. Цей тип ПЕ найбільш розроблений і широко застосовується в автономних енергосистемах в космонавтиці і військово-морському флоті. Їх основним недоліком є неприпустимість наявності CO₂ в паливі і окислювачі, а також необхідність використання дорогої платини. Термін служби таких ПЕ до 10000 годин.

В ПЕ з фосфорнокислим електролітом використовують несучу матрицю з карбиду кремнію SiC, яку просочують концентрованою (98% -ної) фосфорною кислотою. Діапазон робочих температур цього типу ПЕ 150 - 220 °С, термін служби до 50000 год. Основними їх недоліками є чутливість до отруйних домішок, необхідність використання дорогої платини, трудність запобігання деградації шарів каталізатора на електродах і руйнування пористої матриці, використовуваної для іммобілізації фосфорної кислоти. В даний час ці ПЕ витісняються іншими, більш ефективними і економічними.

Електролітна частина ПЕ на основі розплавів карбонатів є керамічну матрицю (LiAlO₂), просочену розплавом суміші карбонатів лужних металів (літію, натрію, калію). ПЕ даного типу працюють при температурах 600 – 700 °С без електрокаталізаторів. За своїми технічними характеристикам цей тип ПЕ аналогічний фосфорнокислим. Термін їх служби складає до 20000 год. Застосування карбонатно-расплавних ПЕ обмежена складністю

утримання розплаву в пористої матриці та недостатньою стійкістю конструкційних матеріалів при робочих температурах 700 – 1000 °С. В силу потенційної дешевизни ці ПЕ планують застосовувати в майбутньому в стаціонарних енергоустановках.

Твердотільні ПЕ в якості електроліту використовують кераміку на основі ZrO_2 , модифікованого добавками оксидів рідкоземельних елементів (зазвичай Y_2O_3). Такі ПЕ працюють при 900-1000 °С і найбільш перспективні для використання в великих стаціонарних енергоустановках. Високотемпературні ПЕ як окислювач використовують повітря, а в якості палива - водень, метан та інші, причому вони вкрай невибагливі до їх якості. Єдиним недоліком таких ПЕ, як і електролізерів з твердооксидних електролітом для отримання водню, є небажаність частих пусків / зупинок, пов'язаних з нагріванням до робітників і охолодженням до кімнатних температур. Термін їх служби до 60 000 год.

Лужні, твердополімерні і фосфорнокислі електроліти дуже чутливі до СО. У карбонатних і твердооксидних паливних елементах СО є паливом. Чутливість до CO_2 лужних елементів теж дуже висока, але CO_2 не впливає на роботу інших паливних елементів. Досить велику чутливість до таких домішок, як H_2S і COS , показують всі паливні елементи. Домішки віднесені до отруйних, якщо їх присутність приводить до виходу з ладу паливних елементів внаслідок отруєння електродів або електролітів. У кінцевому рахунку домішки до водню скорочують термін служби паливних елементів.

Зараз у світі активно розробляються твердополімерні паливні елементи на водні. Вважається, що вони будуть застосовуватися в основному на автотранспорті. Поки їх вартість досить висока: 1 кВт установленної потужності в кращих зразках обходиться в \$ 3000 – 5000. Потрібно знизити вартість 1 кВт до \$100, щоб зробити твердополімерні паливні елементи конкурентоспроможними на транспорті. Що стосується автономної енергетики, то для неї призначаються в першу чергу твердооксидні паливні елементи. Вироблений ними 1 кВт встановленої потужності коштує близько

\$ 3000, прийнятна для водневої енергетики вартість - \$ 1000 - може бути незабаром досягнута [8].

Паливний елемент – лише складова частина електрохімічного генератора, який містить ще системи кондиціонування, підготовки палива, утилізації відходів та ін. Первинним паливом можуть бути метан, пари метанолу, гасу, синтез-газ і т.д. Коефіцієнти корисної дії у генераторів з паливними елементами змінюються від 30% (двигуни внутрішнього згорання і газові турбіни) до 60-65% (енергоустановки з твердооксидних паливними елементами).

У мегаватних установках для децентралізованої енергетики використовуються фосфорнокислотні і розплав-карбонатні паливні елементи і метан як паливо з подальшим перетворенням його у водень хімічними методами. На транспорті знаходять застосування кіловатні енергетичні установки з твердооксидних і твердополімерними паливними елементами.

У Японії створена енергетична установка на паливних елементах потужністю 100 кВт, у Німеччині - установка потужністю 250 кВт, що функціонує як невелика автономна електростанція. Фірма «Сіменс Вестігхаус» розробила гібридну енергетичну установку на твердооксидних паливних елементах. У ній потужний струмінь вихідних газів використовується для роботи газової турбіни, тобто до електричної енергії, що виробляється паливними елементами, додається електрична енергія, що виробляється турбіною. Найбільші автомобільні компанії світу ведуть розробку електромобілів. У таких містах, як Амстердам, Барселона, Лондон, Гамбург, Мадрид, пройшли показові випробування міських автобусів на паливних елементах. Перша така демонстрація відбулася в 1993 р., а найбільша їх число припало на 1999-2003 рр.: 60 демонстрацій 17 компаній, що виробляють легкові автомобілі, і 11 демонстрацій 7 компаній, що випускають автобуси. Компанії «Дженерал Моторс» і «Даймлер-Крайслер» мають намір продемонструвати електромобіль в 2004 р. (водень

передбачається отримувати з бензину), компанії «Баллард Пауер Системі» та «Даймлер-Крайслер» - в 2005 р.

В даний час найбільші успіхи досягнуті у створенні ПЕ з електролітами у вигляді полімерних мембран [9, 10]. У такому ПЕ основною частиною є протонпровідна полімерна мембрана у вигляді тонкої плівки на основі перфторованих полімерів, які містять в своєму складі в якості донорів протонів сульфокислотні групи типу «нафіон» з нанесеним на обидві боки каталізатор (зазвичай метали Pt-групи). Робоча температура даного типу ПЕ складає 60-80 °С. Подальше підвищення ефективності полімерелектролітних мембранних ПЕ пов'язано з можливістю їх функціонування в області температур 100 - 200 °С в умовах низької вологості або при її відсутності.

Використання водню і ПЕ, що є основою так званої воднево-орієнтованої енергетики, відкриває унікальний шлях до інтегрованим «відкритим енергосистем», які відповідають всім основним вимогам енергетики та охорони навколишнього середовища.

Воднево-орієнтовані системи можуть стати «містками» в майбутнє, незважаючи на те, що реалізація економічно ефективного переходу до водневій енергетиці пов'язана з величезними труднощами. В даний час розрив між сучасним станом методів виробництва, зберігання і використання водню і таким, необхідним для конкурентної водневої енергетики, занадто великий. Щоб подолати це, потрібно фундаментальний прорив в цій області, що можливо тільки на основі фундаментальних наукових досліджень [11].

2 РІВЕНЬ ВПРОВАДЖЕННЯ ВОДНЕВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ В КРАЇНАХ СВІТУ

2.1 Воднева енергетика як галузь майбутнього

Коли мова йде про водневу енергетику, ключовою є теза, що тільки спалювання водню є абсолютно екологічно безпечним, оскільки при цьому нічого, крім води, не утворюється. Якби водень був так само доступний, як і природний газ, він би й справді став ідеальним паливом, яке не забруднює довкілля. Однак реальні промислові методи одержання водню базуються або на генеруванні його з інших видів органічного палива (природний газ, продукти нафтопереробки), або на електролізі води.

Воднева енергетика – це напрям вироблення та споживання енергії людиною, який базується на використанні водню у якості засобу для акумулювання, транспортування та вживання енергії населенням, транспортом та різними виробничими напрямками. Водень обрано як найпоширеніший елемент на поверхні Землі та у космосі, він має найбільшу енергоємність, а продуктом його згоряння є тільки вода, що знову вводиться у обіг. Термін «воднева енергетика» був запропонований Джоном Бокрісом під час лекції, яку він прочитав у 1970 році в Технічному центрі General Motors (GM). Водень може бути використаний як паливо для будь-яких транспортних засобів (у тому числі легкових автомобілів та катерів), а також для задоволення енергетичних потреб будівель (прилади для безперервного живлення) і як живлення для побутової техніки. Водню в чистому вигляді у природі майже немає, тож його потрібно виробляти в процесі електролізу води або іншим способом. Скорочення викидів діоксиду вуглецю, пов'язане з використанням водневого палива, досягається завдяки паливним елементам високої ефективності. За умов забезпечення виробництва водню енергією,

одержаною з неуглецевих джерел, викидів діоксиду вуглецю немає зовсім. Водень можна виробляти з відновлюваних ресурсів, а також можна використовувати для зберігання енергії з непостійних джерел.

Водень – це енергоносіє (як, наприклад, електрика), а не основне джерело енергії (як, наприклад, вугілля). Використання водню як палива позитивно вплине на енергетичну безпеку, екологію та економічне зростання. Водень допоможе поліпшити енергетичну безпеку (тобто незалежність від країн-постачальників), тому що його можна отримувати із багатьох первинних джерел енергії, зокрема і відновлюваних. Таким чином, водень може стати повноцінною альтернативою нафті. Водень можна отримувати використовуючи найрізноманітніші природні ресурси: газ, вугілля, органічні відходи, біопаливо, відходи сільського господарства. Основна частина водню, що виробляється промисловістю, добувається з природного газу, але передбачається збільшення ролі інших джерел. Для отримання водню можна використовувати різноманітні джерела енергії: викопні копалини, ядерну енергію та відновлювані технології, такі як сонячна, вітрова, гідро-, біо-, та геотермальна енергії. Завдячуючи такому різноманіттю ресурсів та технологій, водень можна буде виробляти у всіх регіонах країни та у цілому світі. Сьогодні із понад 50 млн. тонн водню, що виробляється, половина отримується шляхом конверсії водяної пари із природним газом (48%). Також водень добувають із нафти (30%), вугілля (18%) та води (4%) [12]. У сучасній вуглеводневій енергетиці транспортування живиться насамперед нафтою. Внаслідок спалювання вуглеводневого палива виділяється діоксид вуглецю та інші забрудники атмосфери. Запас економічно вигідних вуглеводневих ресурсів у світі обмежений, а попит на вуглеводневе паливо зростає, особливо в Китаї, Індії та інших країнах, що розвиваються. Прихильники майбутнього впровадження водневої енергетики у світових масштабах стверджують, що водень може бути екологічно чистішим джерелом енергії для кінцевих споживачів, особливо у транспортній галузі, в місці кінцевого використання викидів забруднюючих речовин та твердих

часток або діоксиду вуглецю не буде. У аналізі, проведеному в 2004 році, стверджується, що «весь ланцюг водневого постачання вивільняє значно менше вуглекислого газу в атмосферу, ніж бензин у гібридних автомобілях», і що значне скорочення обсягу викидів двоокису вуглецю був би можливий, якби в місцях виробництва енергії та водню були використані методи поглинання або ізоляції вуглецю [13].

Виробництво водню – велика галузь, що швидко зростає. У 2004 році в усьому світі було вироблено близько 50 мільйонів тонн водню, що відповідає близько 170 мільйонам тонн нафтового еквівалента [14]. Темп росту галузі становить близько 10% на рік. У 2004 році у США обсяг виробництва становив близько 11 мільйонів метричних тонн (ММТ) середнього потоку потужності в 48 гігаватт [15].

Сьогодні водень отримують головним чином (90%) з викопних джерел. Зв'язок централізованого виробництва з депо малотоннажних автомобілів на паливних елементах потребуватиме розміщення та будівництва розподільчої інфраструктури з великим вкладенням капіталу. Одне з завдань водневої енергетики – забезпечення компактного та безпечного зберігання водню на борту транспортного засобу, з метою подовжити інтервал між заправками. На Землі у звичайних природних умовах молекулярний водень майже не зустрічається. Більшість водню на Землі зв'язана з киснем у воді. Виробництво елементарного водню вимагає переробки носія водню, наприклад, викопного палива і води. Витрачаються викопні ресурси та виділяється вуглекислий газ, але найчастіше подальший вклад енергії, крім викопного палива, уже не потрібний. Розкладання води вимагає витрат електроенергії або тепла, одержаного з будь-якого первинного джерела енергії (спалення викопного палива, атомної енергії або відновлюваних джерел енергії). В промисловості водень виробляється через перетворення пари, з використанням викопних видів палива, наприклад, природного газу, нафти чи вугілля. Енергоємність виробленого водню менше, ніж енергія, що міститься у вихідному паливі, але завдяки високому ККД паливних елементів

вона може бути використана повніше, ніж при безпосередньому використанню вихідного палива. Внаслідок перетворення вихідного палива, в атмосферу може викидатися вуглекислий газ, так само, як внаслідок роботи двигуна автомобіля. Але завдяки високому ККД паливних елементів його кількість може бути меншою, ніж при використанні палива безпосередньо. Невелика частина водню (4% в 2006 році) отримується шляхом електролізу води. Для одержання кілограму водню таким шляхом необхідно витратити приблизно 50 кіловат-годин електроенергії.

Інфраструктура водневої енергетики складається з промислової трубопровідної системи, призначеної для транспортування водню, і водневих заправних станцій, як, наприклад, ті, що знаходяться на так званому «водневому шосе» (шосе, вздовж яких розміщується низка водневих заправок). У водневих заправках, які не розташовані поруч з водневою трубопровідною системою, постачання водню здійснюється через доставку цистерн із стисненим або зрідженим воднем вантажівками, або ведеться виробництво водню на місці.

Через скрихчення сталі воднем, труби, призначені для природного газу, повинні бути покриті всередині або замінені на нові. Хоча встановлення дороге, такі трубопроводи є найдешевшим способом транспортування водню з пункту А в пункт Б. Постачання водню трубопроводами – звичайна складова виробництва у комплексах крекінгу нафти, в яких водень потрібен для проміжного використання при гідрокрекінгу для вдосконалення виробництва палива з сирої нафти.

Теоретично, транспортування водню трубопроводами можна уникнути при розгалуженій системі виробництва водню, у якій водень вироблятиметься на місці за допомогою генераторів середніх і малих розмірів, які будуть виробляти достатньо водню для особистого користування, або, можливо, для постачання сусіднім користувачам. Врешті-решт, найвдалішим може виявитися поєднання кількох варіантів транспортування і розповсюдження водню.

Мільйони тонн водню щороку розповсюджуються у всьому світу різними способами, але постачання водню окремим споживачам вимагатиме еволюції паливної інфраструктури.

Завдяки водневій енергетиці новий вид палива прийде на зміну викопному паливу, яке спалюється у двигунах внутрішнього згорання і турбінах як основний метод перетворення хімічної енергії в кінетичну або електричну енергію; таким чином викиди парникових газів і забруднення навколишнього середовища, спричинені такими двигунами, припиняться.

Інтерес до водневої енергетики сфокусований головним чином на перспективі використання паливних елементів в автомобілях. Відношення потужності до ваги у паливних елементах може бути найкращим, вони набагато ефективніші, ніж двигуни внутрішнього згорання, до того ж не виробляють шкідливих відходів. Якщо буде впроваджено практичний метод зберігання водню, а вартість паливних елементів знизиться, вони можуть стати економічно конкурентоспроможними в порівнянні з автомобілями на гібридних паливних елементах/батареях або на звичайних двигунах. Економічна конкурентоспроможність транспортних засобів на паливних елементах зростатиме з ростом цін на вуглеводневе паливо, що використовується у двигунах внутрішнього згорання, адже легкодоступні резерви цих ресурсів майже виснажені, а також з огляду на штрафи за забруднення навколишнього середовища.

В майбутньому у водневій енергетиці сировина та первинні джерела енергії будуть використовуватися для одержання водню як резерву енергії для різних секторів економіки. Виробництво водню з первинних джерел енергії, крім вугілля, нафти і природного газу, призведе до скорочення викидів парникових газів, які утворюються при горінні цих викопних енергоресурсів.

Однією з основних властивостей водневої енергетики є те, що у пересувних конструкціях (в основному в автомобільному транспорті) виробництво і використання енергії відбувається окремо. Тепер первинне

джерело енергії не повинне подорожувати разом з автомобілем, що відбувається при використанні вуглеводневого палива. Можна уникнути утворення і розсіяння вихлопних викидів, якщо енергія (разом з забрудниками навколишнього середовища) буде одержана з точкових джерел, тобто у великих, централізованих об'єктах з високою ефективністю. Це дасть можливість застосовувати такі технології, використання яких у рухомих механізмах неможливе (наприклад, технологія зв'язування вуглецю). Також можуть бути застосовані системи розповсюдження виробленої енергії, пов'язані з водневими заправними станціями.

Якщо не брати до уваги виробництво необхідної енергії, виробництво водню може бути як централізованим, так і розгалуженим, або тим і іншим одночасно. Виробництво водню на заводах, що використовують первинну енергію, обіцяє бути високоефективним, але у той же час труднощі, пов'язані з транспортуванням великих об'ємів водню (у зв'язку з дифузією водню крізь тверді матеріали та подальшим їхнім скрихченням) роблять вигіднішим для водневої енергетики транспортування електричної енергії. За такої системи невеликі місцеві заводи чи навіть заправні станції можуть виробляти водень, використовуючи енергію, надану розгалуженою електромережею. Хоча ефективність централізованого виробництва водню, ймовірно, вища, витрати енергії на транспортування водню роблять таку систему врешті-решт менш ефективною за розгалужену, якщо розрахувати витрати енергії на виробництво і надання кінцевому користувачу одного кілограму водню.

Дотримання балансу між транспортуванням водню та передачею електроенергії на далекі відстані є надзвичайно важливим для водневої енергетики.

Але знову ж таки, можна уникнути складного вибору джерел виробництва і способу транспортування водню, якщо водень буде автономно вироблятися в місцях використання (в будинках, на промислових об'єктах, або на заправних станціях) з відновлюваних джерел.

Дослідження результативності ефективності водневих транспортних засобів у порівнянні з іншими показують, що автомобілі на водневих паливних елементах, як правило, приблизно втричі ефективніші в порівнянні зі звичайним двигуном внутрішнього згорання. Всебічне вивчення перспектив впровадження водневих технологій у транспортну галузь показало, що «на шляху розвитку водневої енергетики до відповідного рівня багато перешкод, цей шлях не буде простим і очевидним»[16]. Водневим технологіям необхідно подолати проблему «курки та яйця»: доки не буде розгалуженої системи водневих заправок, ніхто не буде купувати водневі авто; ніхто не буде конструювати заправки, доки не буде достатньої кількості користувачів. Цю проблему можна вирішити поєднанням зусиль держави та великого й малого бізнесу.

2.2 Переваги та недоліки водневої енергетики

Головними перевагами водню разом з екологічністю є практично невичерпна ресурсна база для його одержання та можливість універсального використання (в енергетиці, на транспорті, в елементах живлення різних електронних пристроїв і т. ін.). Однак на сьогодні водневі технології ще не набули тієї якості й ефективності, коли вони могли б замінити традиційну енергетику та існуючі традиційні види палива і технології на транспорті.

Проте існують і «мінуси» в розвитку водневої енергетики:

– Молекулярний водень повільно витікає навіть з найгерметичніших ємностей. Припускають, що внаслідок витіку великого об'єму водню через ультрафіолетове випромінювання можуть утворитись в стратосфері вільні радикали, які прискорюватимуть стоншення озонового шару.

– Побоювання населення що водень – дуже займистий газ з тих, що спалахують при змішуванні з повітрям. В 2001 р. у США штат Флорида експериментально було підтверджено, що водень безпечніший, ніж бензин,

бо він горить вертикальним струменем, у той час, як бензин розливається підлогою та спалює все, на що він потрапляє.

– Трубопроводи для водню дорожчі навіть за міжміські лінії електропередач. Водень приблизно втричі об'ємніший за природний газ тієї ж теплоємності, прискорює руйнування сталі, що підвищує експлуатаційні витрати та об'єми витоків.

– Впровадження водневої енергетики потребуватиме величезних інвестицій в інфраструктуру для зберігання та розподілення водню.

Стосовно технології одержання водню необхідно відзначити, що він є вторинним енергоносієм і в природі зустрічається тільки у виді різних сполук. Але ресурсна база для його одержання є досить широкою. Крім води, з якої водень можна одержати шляхом електролізу з використанням електричної та теплової енергії, до ресурсної бази належать практично всі викопні види палива, різні види біомаси, а також різні відходи виробництва, побутові відходи та ін.

Найбільш відомі технології одержання водню базуються на хімічному, термотехнічному процесах та електролізі води, але вони мають такі головні недоліки, як використання високо потенційної енергії з витратами викопного палива і відповідно значним забрудненням довкілля. Недоліком електролізу води є значний рівень споживання електроенергії. Електролітичний водень є найбільш доступним, але більш коштовним продуктом. Сьогодні у світі найбільше розповсюдження отримала технологія виробництва водню або суміші водню з іншими газами шляхом парової конверсії природного газу - метану, але при цьому майже половина початкового обсягу газу витрачається на проведення ендотермічного процесу парової конверсії. У зв'язку з цим у світі ведеться інтенсивний пошук таких технологій одержання водню, які б відповідали вимогам економічної та енергетичної ефективності й екологічної чистоти.

Зокрема, для виробництва водню вигідно використовувати теплову і електричну енергію, що виробляють АЕС в так званому провальному режимі,

тобто у нічний час, коли падає рівень звичайного споживання енергії. Перспективним є електроліз води у поєднанні з нетрадиційними поновлюваними джерелами енергії (сонячна, вітрова). Однією з перспективних технологій одержання водню вважається також використання високотемпературних гелієвих реакторів (ВТГР), які розробляються в рамках міжнародного проекту побудови ядерного реактора ГТ МГР (Росія, США, Франція), і, як очікується, будуть екологічно безпечними.

Крім виробництва водню, проблемним питанням є створення економічної і надійної системи зберігання водню. Найбільші надії тут пов'язують з газобалонним, криогенним і металогідридним способами зберігання. Остаточний вибір способу зберігання потребує додаткових наукових досліджень та експертизи.

Перспективним є шлях зниження канцерогенно-мутагенної небезпеки ДВЗ і зменшення експлуатаційної витрати традиційних нафтових палив за рахунок використання альтернативних палив, включаючи водень, який можна застосовувати як основне, так і додаткове паливо [17]. Результати досліджень свідчать, що ініціюючі властивості водню роблять його надзвичайно ефективним для застосування в автомобільних ДВЗ як додаткового палива, що відіграє роль активатора процесу горіння.

Додатковим стимулом вибору водню як енергоносія для автотранспорту є технологічний прорив, пов'язаний з освоєнням паливних елементів (ПЕ) як джерела електроенергії для електродвигуна, що використовується для переміщення автомобіля. У цьому випадку автомобілі на базі водню мають більш високу ефективність, тому що ККД паливного елемента сягає 60 % на відміну від ДВЗ у якого цей показник не перевищує 30 %. Крім того, водневий автомобіль із ПЕ є високоекологічним, тому що викидами є тільки водяна пара – сліди мастильних матеріалів і тверді частинки, що утворюються при зношуванні гальмових колодок і покриттів. Тому в ряді країн Європи почалося широке застосування водню в легкових автомобілях і міських автобусах як основного, так і додаткового енергоносія.

За даними компанії L-B-Systemtechnik GmbH на теперішній час налічується більше 200 типів автомобілів та автобусів, що працюють на водні, при цьому третина з них оснащена ДВЗ, а дві третини – енергоустановками з використанням паливних елементів. В основі технологій, що дозволяють одержувати водень, лежать процеси виділення водню з воденьвміщуючих з'єднань на базі фізико-хімічних перетворень або розкладання молекул води. Тому вартість первинних енергоресурсів, що використовуються при одержанні водню, який є вторинним енергоносієм, має визначальне значення для оцінки доцільності його використання, при проведенні техніко-екологічного обґрунтування. Сучасний рівень водневих технологій, які реалізуються зокрема в електрохімічних установках, створених в Інституті проблем машинобудування Національної академії наук України ім. А. М. Підгорного (ІПМаш НАНУ), дозволяє виробляти і накопичувати водень в системах з високим тиском, безпосередньо в умовах водневих заправних станцій і використовувати його в якості екологічно чистого палива в автомобільних двигунах, що знижує токсичність відпрацьованих газів транспортних засобів і забезпечує економію вуглеводневих енергетичних ресурсів [18, 19].

Інтегральна оцінка повного споживання енергії та супутніх цьому викидів забруднюючих речовин при різних технологій одержання й використання водню на автомобільному транспорті, дозволяє отримати дані, щодо оцінки викидів не тільки від використання палива безпосередньо у двигуні автомобіля, але й по всьому паливному циклу починаючи від одержання первинного енергоносія, забезпечення функціонування інфраструктури для виробництва й доставки водню до бака автомобіля, а також з урахуванням витрат, пов'язаних з виробництвом самого транспортного засобу і його наступною утилізацією [20].

Це дає можливість оцінити повне навантаження на навколишнє середовище й підійти до розрахунку соціально-економічної складової запропонованих технологій. Як відмічалось автомобіль на водні з ПЕ є

практично чистим технологічним об'єктом, якщо розглядати тільки стадію його використання. Однак, при цьому слід враховувати значні витрати енергії та відповідні викиди в навколишнє середовище на стадіях видобутку сировини й генерування електроенергії для одержання водню. Крім того, необхідно додати витрати, що пов'язані з різницею виробництва традиційного й водневого автомобілів, тому що конструкція вузлів і агрегатів, а також склад матеріалів, які використовуються, помітно розрізняється. Аналіз результатів закордонних досліджень свідчить, що подорожчання водневого автомобіля при виході на комерційне використання оцінюється в розмірі близько 20–30 % порівняного з бензиновим аналогом [21, 22].

Тому для коректного порівняння ефективності водневих технологій варто аналізувати повні витрати енергії на реалізацію життєвого циклу виробу з урахуванням екологічних факторів, характерних для кожного з етапів. Результати такого комплексного аналізу є основою вибору пріоритетних напрямків інноваційної діяльності й розробці стратегії розвитку автомобільного транспорту.

2.3 Розвиток водневої енергетики у світі

Сьогодні фахівці прогнозують, що у недалекому майбутньому традиційні види палива може замінити екологічно чистий і невичерпний водень. Тож для багатьох країн світу дослідження з водневої енергетики стають пріоритетними напрямками розвитку науки. Вони забезпечуються фінансуванням як з боку держави, так і бізнесових структур. Зрозуміло, що основна мета розробки водневих технологій – зниження залежності від традиційних енергоносіїв, а головне – зменшення токсичних викидів в атмосферу від спалювання вуглеводнів.

Воднева енергетика розглядається багатьма фахівцями саме як засіб досягнення завдань глобальної енергетичної революції, й тому в розвинутих

країнах світу їй приділяється значна увага та виділяються значні кошти на розвиток і впровадження її технологій. Найбільш динамічно ці роботи розвиваються у США, Канаді, Японії, країнах ЄС, де поряд зі значним обсягом науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт, провадяться активні роботи з комерціалізації водневої енергетики. В країнах світу створена значна кількість енергетичних установок на паливних елементах потужністю від одиниць ват до мегават, які уже сьогодні конкурентоспроможні з установками, в яких використовуються традиційні технології. У багатьох країнах розроблені та виконуються відповідні довгострокові програми, на виконання яких виділяються значні кошти. Зокрема, у США на цілі водневої енергетики виділяється до 1 млрд дол. на рік. Останнім часом у більшості європейських країн, у тому числі в Росії, спостерігається швидке зростання активності в області водневої енергетики і розробки паливних елементів.

Значна увага в цих країнах приділяється також формуванню політичної й суспільної свідомості, освіті та підвищенню кваліфікації, тобто підготовці суспільства до сприйняття нового (водневого) напрямку в енергетичній політиці. Активну роль у цій сфері відіграють екологічні громадські асоціації, оскільки вони привертають увагу урядових органів до цієї проблемної тематики, поширюють інформацію серед населення, викликаючи зростання інтересу і довіри до нових технологій.

Кілька внутрішніх автомобільних компаній США виділили ресурси на розробку автомобілів на водневому паливі. Дистрибуція водню для транспорту наразі випробовується в усьому світі, зокрема в США, Німеччині, Японії, Ісландії, Португалії, Норвегії, Данії, Канаді тощо.

У деяких лікарнях були встановлені комбіновані установки з електролізерів та паливних елементів для аварійного електроживлення. Вони вигідні для використання в надзвичайних ситуаціях, бо майже не потребують технічного обслуговування, зручно розташовуються в порівнянні з генераторами внутрішнього згорання.

Ісландія зобов'язалась стати першою у світі країною, що повністю забезпечить свої енергетичні потреби за допомогою водневої енергетики до 2050 року [23]. Ісландія в унікальному положенні. Сьогодні вона імпортує всі нафтопродукти, необхідні для живлення автомобілів і риболовецького флоту. Ісландія має великі геотермальні ресурси, настільки великі, що місцева ціна на електроенергію фактично нижча, ніж ціна на вуглеводні, які можуть бути використані для виробництва цієї енергії. Ісландія вже перетворює надлишки електроенергії в експортні товари та замітники вуглеводнів. У 2002 році вона виробляла 2000 тонн водню шляхом електролізу – головним чином для виробництва аміаку (NH_3) для добрив.

Експериментальний проект, що демонструє можливості водневої енергетики, працює на норвезькому острові Утсіра. Споруда виробляє енергію вітру і водневе паливо. У періоди, коли виробляється надмірна енергія вітру, ця надлишкова енергія використовується для одержання водню шляхом електролізу. Водень накопичується, щоб бути використаним для вироблення електроенергії в періоди, коли вітер слабкий.

Подібне поєднання енергії вітру і водневої енергетики діє в штаті Колорадо на спільному підприємстві NREL і Xcel Energy.

Компанія Newfoundland and Labrador Hydro перетворює сучасні вітро-дизельні енергосистеми на ізольованому острові Рамеа у воднево-вітрові гібридні енергосистеми.

Аналогічний експериментальний проект на острові Стюарт використовує сонячну енергію замість енергії вітру для вироблення електроенергії. Якщо виробляється надлишкова електроенергія після повної зарядки акумуляторів, починає вироблятися водень шляхом електролізу, який зберігається для подальшого виробництва електроенергії паливними елементами.

У січні 2004 року у Великобританії стартувала експериментальна програма використання паливних елементів. Програма запустила на 25-ий

маршрут в Лондоні два автобуси на паливних елементах, які працювали там до грудня 2005 року і були переведені на маршрут RV1 до січня 2007.

Сьогодні Воднева Експедиція працює над створенням корабля на водневих паливних елементах, щоб здійснити на ньому кругосвітню подорож як спосіб показати можливості водневих паливних елементів.

Західноавстралійський департамент планування та розвитку інфраструктури сьогодні експлуатує три автобуси від Daimler Chrysler Citaro, що працюють на паливних елементах. Це частина програми «Стійке живлення для випробування пертських автобусів на паливних елементах у Перті». Компанія Path Transit відповідає за роботу цих автобусів на звичайних маршрутах громадських автобусів у Перті. Випробування почалося у вересні 2004 року і завершилось у вересні 2006 року. Паливні елементи цих автобусів використовували систему протонного обміну в мембрані та живився необробленим воднем із ВР рафінадного заводу в Квінані, на південь від Перта. Водень – побічний продукт роботи цього заводу. Автобуси заправляються на станції в північному передмісті Перта, яке називається Малага.

Надзвичайно перспективним шляхом отримання горючих газів з великим вмістом водню, а значить можливості одержання великої кількості енергії є спалювання рідкого палива типу дизельного чи пічного палива світлого із додаванням перегрітого водяного пару (в пропорції мінімум 1 частина води і одна частина палива).

Компанія «Quntum-Tecstar» розробила для водню металокомпозитні заправні баки для автомобільного транспорту на робочий тиск 70 МПа [24]. При такому тиску питомий обсяг зберігання газоподібного водню наближається до питомого обсягу його зберігання в рідкому стані. Для транспортування газоподібного водню розроблено конструкцію автопричепа, основу якого становлять 10 штук сферичних ємностей високого тиску зі сталі 12ХН2МДФ-Ш об'ємом 0,9 м³ з робочим тиском 31,3 МПа, які виготовлено ВАТ «Сумське машинобудівне наукове виробниче об'єднання ім. Фрунзе».

Середній обсяг перевезення водню одним вантажним автомобілем становить близько 1400 кг для газоподібного водню під тиском і приблизно 1600 кг для рідкого водню. Вартість доставки водню на відстань 1000 км буде становити: для газоподібного водню – 3,0 дол./кг при автомобільних перевезеннях, і для рідкого водню – 4,0 дол./кг. Наступною складовою витрат при використанні водню є витрати на заправлення автомобілів на рідкому і на газоподібному водні під тиском. Капітальні витрати на створення автономної заправної станції для стислого водню становлять ~270 тис. дол. США (для зрідженого водню – 450 тис. дол. США). При терміні служби устаткування на роздавальній колонці для стислого водню 15 р. та 10 р. для зрідженого газу вартість водневого палива у споживача зростає на 0,3 дол./кг для стислого водню і на 0,5 дол./кг для рідкого. Таким чином, інфраструктурні витрати в сумі збільшують вартість водню (додатково до вартості його одержання) в баці автомобіля на 0,1–1,5 дол./кг для газоподібного водню і приблизно на 2,3–3,0 дол./кг для зрідженого, що повністю виключає його з поля конкурентноздатних технологій в автотранспортній інфраструктурі. Для підвищення ефективності використання водню, виготовленого за допомогою вітрових електростанцій (ВЕС) необхідно суттєве зниження вартості ВЕС, у першу чергу за рахунок складової вартості фотоелектричних перетворювачів.

2.4 Впровадження водневої енергетики в Україні

В Україні поки що дослідження в області водневих технологій знаходяться у початковому стані, не зважаючи на те, що вони проводяться впродовж тривалого часу. Основні причини, що перешкоджають активізації проведення робіт з водневої енергетики в Україні, є наступні:

- відсутність стратегії розвитку водневої енергетики як енергетики майбутнього (XXI століття), національної програми з розробки і виробництва водневих паливних елементів та енергетичних установок на їх основі, а також відповідної законодавчої бази;

- відсутність цільового державного фінансування фундаментальних і прикладних досліджень та розробок в області водневої енергетики;
- неготовність приватного бізнесу до субсидування фундаментальних і прикладних досліджень;
- відсутність чіткої і ясної державної політики та реальної підтримки робіт з екологічно чистих ресурсо- і енергозберігаючих технологій.

Безсумнівною перевагою водневої енергетики для України могла б стати можливість значного зменшення енергетичної залежності країни за рахунок перетворення існуючих власних енергетичних ресурсів (вугілля, торфу, сланців, біомаси, промислових відходів та ін.) у водень з його подальшим використанням для задоволення енергетичних потреб країни. У цьому сенсі, на наш погляд, перспективним для України є спосіб одержання водню шляхом газифікації вугілля, запасів якого в Україні достатньо. Продукт газифікації (водень) може використовуватися в паливних елементах для виробництва електричної і теплової енергії на електростанціях як для децентралізованого, так і централізованого енергопостачання. Широкі можливості для перетворення вугілля безпосередньо в надрах у горючий газ, який містить водень, має підземна газифікація вугілля. Має сенс також розвивати гібридну енергетику як комбіновану систему: паливні елементи, газові турбіни, парові турбіни.

В Україні існує також можливість одержання водню як побічного продукту при хімічних, коксохімічних та нафтопереробних виробництвах, використання для одержання водню скидних газів чи різних органічних сполук. Одне із таких виробництв існує на території Казенного підприємства «Екоантилід» (м. Дніпродзержинськ Дніпропетровської обл.), потужності якого дозволяють виробляти водень, важку та легку воду. Екологічний ефект від використання побічних продуктів досягається тим, що одержана з них енергія заміщує енергію, яка повинна вироблятися із викопного палива, у т.ч. імпортованого.

Щодо екологічних переваг водню, то слід зазначити, що паливні елементи є кінцевою ланкою водневого циклу, а чистота попередніх ланок залежить від технології переробки сировини і технологій одержання водню та поводження з ним (перетворення, транспортування та ін.). Ці переваги очевидні, якщо для його одержання використовуються чисті технології, наприклад, енергія вітру, сонця, термальні води та інші відновлювальні джерела. Крім того, акумулюючі властивості водню можуть забезпечити рівномірний графік виробництва електроенергії сонячною та вітровою енергетикою при несприятливих для них погодних умовах. Використання паливних елементів на автомобільному транспорті дозволить значно покращити екологію довкілля великих міст, які сьогодні потерпають від локальної концентрації продуктів згорання двигунів автотранспорту.

Технологічний ланцюг водню, який включає видобування (конверсія, електроліз), його перетворення (до стиснутого або зрідженого стану, або закачування у гідриди), транспортування до місця його використання і безпосередньо використання в паливних елементах на кожному етапі потребує енергетичних витрат, що в кінці кінців і визначає його відносно низьку загальну енергоефективність [25]. Більш привабливі перспективи в цьому плані має водневий цикл, який базується на використанні енергії нетрадиційних відновлюваних джерел енергії (НВДЕ), але ця енергія поки що є досить дорогою, як і самі водневі технології, включаючи паливні елементи. З часом, коли ці технології набудуть більш широкого розповсюдження і відповідно стануть більш дешевими, вони можуть стати конкурентоспроможними.

Головними проблемними питаннями на цьому шляху є:

- підвищення ККД та покращення екологічних характеристик всього технологічного циклу водневої енергетики (виробництво водню, виробництво комплектуючих частин паливних елементів, перетворення палива в електроенергію);
- зменшення вартості водневого циклу перетворення;

- збільшення ресурсу експлуатації паливних елементів;
- забезпечення безпеки на всіх етапах виробництва, перетворення, зберігання, транспортування та застосування водню.

Таким чином, водневі енергетичні технології в дійсний час ще не набули у світі тієї якості й ефективності, коли вони могли б замінити традиційну енергетику та існуючі нафтові технології на транспорті. Однак потенційні можливості водневих технологій дозволяють прогнозувати широке їх використання у майбутньому, чому сприятимуть зазначені переваги водню перед викопними видами палива.

Для України в найближчій перспективі можна говорити про використання водневих технологій в автономних системах енергоспоживання та на транспорті, насамперед, в комбінації з газифікацією вугілля або біомаси, а також сонячною та вітровою енергетикою [26]. Україні (в першу чергу українським вченим) слід також знайти свою нішу в міжнародних проектах з розробки високотемпературних реакторних установок типу ВТГР для комбінованого виробництва водню і електроенергії. Але темпи впровадження цих технологій і напрямки розвитку відповідної галузі будуть залежати як від вирішення вище зазначених проблем, так і від розвитку інших технологій, альтернативних водневій. Дуже перспективним є метод отримання водню із води Чорного моря. Кількість сірководню, розчиненого у воді, оцінюється у 4,5 млрд тон.

При успішному розвитку водневої енергетики Україна могла б повністю використати свою багату енергоресурсну базу, диверсифікувати джерела енергії, покращити екологічну ситуацію в країні. Це також і шлях впровадження високих технологій світового рівня та розбудови відповідного сектору промисловості, можливість виходу на ринки з екологічно чистими технологіями і устаткуванням. Для цього потрібно підтримати існуючі в країні наукові розробки, які проводяться у низці інститутів НАНУ шляхом організації та фінансування відповідних досліджень. Серед них: Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного (розробка технологій

виробництва водню), Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича (одержання матеріалів для виготовлення паливних елементів, розробки накопичувачів водню, розробки паливних елементів), Інститут електрозварювання ім. Є.О.Патона (технології нанесення плівок різного застосування, герметизація батарей паливних елементів шляхом зварювання, дослідження поведінки металевих матеріалів у водневому середовищі, виготовлення балонів для водню та ін.), Фізико-механічний інститут ім. Г.В.Карпенка (випробування механічних властивостей матеріалів в різних середовищах та при різних температурах), Інститут газу (глибоке очищення водню, створення систем його зберігання, створення гібридних воднево-сонячних установок), Інститут загальної та неорганічної хімії ім. В.І.Вернадського (теоретичні роботи з водневої енергетики, синтез порошоків для виготовлення паливних елементів), Інститут хімії високомолекулярних сполук (розробка полімерних паливних елементів та матеріалів для їх виготовлення), Донецький фізико-технічний інститут ім. В.Галкіна (отримання цирконієвої кераміки для паливних елементів та матеріалів для них) та інші наукові заклади і підприємства. Для концентрації зусиль з розробки водневих технологій було б доцільним утворити кооперацію науково-дослідних установ під егідою НАНУ та розробити відповідну Програму із залученням як державних, так і приватних інвестицій для її виконання. Наявність в Україні значних покладів цирконієвих руд, рідкоземельних елементів та промисловості з їх переробки, могли б забезпечити виробництво паливних елементів з використанням передових вітчизняних технологій. Доцільно було б також забезпечити на початковому етапі пільгове оподаткування та іншу законодавчу підтримку виробництва паливних елементів та інших складових водневих систем. Це дозволило б Україні у майбутньому знайти своє місце в розподілі та використанні водневих технологій у міжнародному масштабі, створити нові робочі місця для висококваліфікованих фахівців, як в галузі стратегічних наукових досліджень і розробок, так і на високотехнологічних виробництвах.

Разом з цим, необхідно вже сьогодні максимально використати ті можливості, які є в Україні. А для цього, в першу чергу, зберегти виробництва, де водень виробляється як побічний продукт, використати скидний потенціал металургійних та хімічних виробництв, розвинути біотехнології для одержання водню, використати потенціал електроенергетики (особливо ядерної енергетики) в провальний період споживання (нічні часи) для виробництва водню. Потрібно також максимально задіяти нові технології виробництва моторного палива з вугілля (де використовується водень), що дозволить розширити обсяг використання вугілля в тому числі і вугільних відходів, зменшити імпорт нафти та нафтопродуктів і тим самим зменшити енергетичну залежність України. Це також дозволить підвищити конкурентоспроможність вітчизняної продукції на внутрішньому та зовнішньому ринках за рахунок використання власних більш дешевих енергоресурсів.

Для активізації процесу та успішної реалізації завдань розвитку водневої енергетики в Україні пропонується:

- утворити кооперацію науково-дослідних установ під егідою НАНУ та розробити відповідну Програму робіт із залученням як державних, так і приватних інвестицій для її виконання;

- максимально використати ті можливості з виробництва водню, які сьогодні є в Україні (природні, наукові, виробничі ресурси);

- використати наявні в Україні значні поклади цирконієвих руд, рідкоземельних елементів та промисловості з їхньої переробки для організації виробництва паливних елементів та інших складових водневих систем;

- на початковому етапі забезпечити пільгове оподаткування та іншу підтримку наукових досліджень та промислових виробництв;

- розробити та впровадити заходи з поширення інформації про нові водневі технології та щодо відповідної освіти і підвищення кваліфікації

енергетичних кадрів з метою підготовки суспільства до сприйняття перспективного водневого напрямку в енергетичній політиці;

- Секретаріату Президента звернутися з відповідними пропозиціями та дорученнями до НАНУ і Кабінету Міністрів України.

У 2009 році було засновано Об'єднання «Воднева Енергетика», з метою розповсюдження водневих технологій та сприяння розвитку водневої енергетики в Україні.

Надзвичайно перспективним шляхом отримання горючих газів з великим вмістом водню, а значить можливості одержання великої кількості енергії є спалювання рідкого палива типу дизельного чи пічного палива світлого із додаванням перегрітого водяного пару (в пропорції мінімум 1 частина води і одна частина палива). Що було продемонстровано на прикладі генераторів тепла потужністю 1 МВт відомого російського ученого і винахідника Аракеляна. В Україні подібна установка прототип потужністю 250 КВт була створена дослідницькою лабораторією GverLab в 2014 році і на даний момент проводяться роботи по створенню більш потужного і більш економного пальникового пристрою, на який в даний момент оформляється патент на корисну модель.

Україна має великий потенціал переходу до енергетичної системи на водневих технологіях. Аналіз умов для розвитку водневих технологій у світі та Україні показує, що різниця між Україною та іншими розвиненими країнами існує, але ця різниця незначна з точки зору наукових і технічних досягнень. Найбільш різкою є відмінність в їх практичному застосуванні. Але її можна швидко позбутися, якщо наукові та промислові сили об'єднуються та будуть фінансово підтримані в правильному напрямку.

3 ВПЛИВ ВОДНЕВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ НА НАВКОЛИШНЄ ПРИРОДНЕ СЕРЕДОВИЩЕ

З розвитком цивілізації споживання енергії невпинно зростає. Разом з цим збільшується антропогенне забруднення довкілля, значна частина якого пов'язана із використанням сучасних видів транспортних засобів. У структурі енергетичних ресурсів 73,4% припадає на екологічно небезпечну сировину – вугілля, мазут і газ. З цієї причини передбачається, що у наступні роки доля водневої енергетики зросте. А це означає, що водень повинен стати доступним і дешевим. Його можна буде застосовувати для літаків, деяких видів наземного транспорту. В автомобілях водень може бути використаний у двигунах внутрішнього згорання або у паливних елементах. При реалізації енергії Сонця або атомної енергії для одержання водню у величезних кількостях він став би одним з найдешевших і екологічно чистих джерел палива.

Водень є одним з перспективних екологічно чистих джерел енергії. Він може знайти ширше застосування у транспорті, металургії, в електроенергетиці, хімічній промисловості, житлово-комунальному господарстві та інших галузях. Вся система, яка об'єднує названі галузі дістала назву водневої енергетики.

Запаси вугілля і газу на Землі є вичерпними, до того ж карбоновмісні види палива створюють екологічну небезпеку. Через це двигуни внутрішнього згорання, що працюють на такому паливі є малоперспективні в екологічному аспекті, тому одним з найпопулярніших способів вирішення цієї проблеми вважають використання електромобілів, де джерелом енергії є хімічна реакція, яка відбувається в акумуляторі. В такому автомобілі рух з

місця і прискорення здійснюються гідравлічним методом, а роботу мотора з постійною швидкістю забезпечує акумулятор.

Загострення проблеми охорони довкілля на фоні зростаючого попиту на паливо та енергію спонукає світову спільноту до ефективного пошуку нових енергетичних технологій, які б забезпечували прийнятний рівень забруднення і одночасно не уповільнювали економічного зростання. Ключове місце в розв'язанні цієї проблеми, на думку багатьох фахівців, займе воднева енергетика – виробництво водню і його використання на основі паливних елементів в промисловості, будівництві, енергетиці, на транспорті, в житлово-комунальному господарстві й інших сферах економіки.

Коли мова йде про водневу енергетику, ключовою є теза, що тільки спалювання водню є абсолютно екологічно безпечним, оскільки при цьому нічого, крім води, не утворюється. Якби водень був так само доступний, як і природний газ, він би й справді став ідеальним паливом, яке не забруднює довкілля. Однак реальні промислові методи одержання водню базуються або на генеруванні його з інших видів органічного палива (природний газ, продукти нафтопереробки), або на електролізі води.

Воднева енергетика – це напрям вироблення та споживання енергії людиною, який базується на використанні водню у якості засобу для акумулювання, транспортування та вживання енергії населенням, транспортом та різними виробничими напрямками.

Сьогодні водень отримують головним чином (90%) з вичерпних джерел. Зв'язок централізованого виробництва з депо малотоннажних автомобілів на паливних елементах потребуватиме розміщення та будівництва розподільчої інфраструктури з великим вкладенням капіталу. Одне з завдань водневої енергетики – забезпечення компактного та безпечного зберігання водню на борту транспортного засобу, з метою подовжити інтервал між заправками. На Землі у звичайних природних умовах молекулярний водень майже не

зустрічається. Більшість водню на Землі зв'язана з киснем у воді. Виробництво елементарного водню вимагає переробки носія водню, наприклад, викопного палива і води. Витрачаються викопні ресурси та виділяється вуглекислий газ, але найчастіше подальший вклад енергії, крім викопного палива, уже не потрібний. Розкладання води вимагає витрат електроенергії або тепла, одержаного з будь-якого первинного джерела енергії (спалення викопного палива, атомної енергії або відновлюваних джерел енергії). Сьогодні є два промислових джерела одержання водню: електроліз води (на нього тривалий час покладають найбільш оптимістичні надії) і хімічна конверсія органічних речовин (горючих копалин, біомаси або продуктів переробки біомаси – спиртів) до синтез-газу (суміш CO та H₂). Для довідки наведемо дані Міненерго США щодо собівартості виробництва водню: з горючих копалин – 1,5, електролізом – 2,5, з біомаси — 2,9 дол./кг [27].

Однією з найважливіших складових національної безпеки будь-якої країни є енергетична безпека. Її рівень визначається потенціалом паливно-енергетичного комплексу (ПЕК), який має забезпечувати країну енергоресурсами – в умовах як стійкого розвитку, так і надзвичайного стану та особливого періоду.

Паливно-енергетичний комплекс, що базується на традиційних енерготехнологіях, надзвичайно інтенсивно забруднює довкілля, значно погіршуючи стан навколишнього природного середовища.

Спалювання палива – не тільки основне джерело енергії, але й найважливіший постачальник у середовище забруднюючих речовин. Разом з тим вплив енергетики на природне середовище у більшій мірі залежить від виду використовуваних енергоносіїв (палива). Найбільш чистим паливом є природний газ, далі нафта (мазут), кам'яні вугілля, бурі вугілля, сланці, торф. Хоча в цей час значна частка електроенергії виробляється за рахунок щодо

чистих видів палива (газ, нафта), однак закономірною є тенденція зменшення їхньої частки.

Зниження рівня забезпеченості глобальної економіки запасами нафти й газу, а також кризовий стан навколишнього середовища викликає стурбованість світової спільноти. В цих умовах позначився інтерес промислово розвинених споживачів до пошуку шляхів більш ефективного використання наявної ресурсної бази, розширення джерел енергозабезпечення та енерготехнологій. Сьогодні зростає вагомість проектів з виробництва та постачань скрапленого природного газу, розвитку альтернативних джерел енергії та водневої енергетики, спостерігається відновлення інтересу до атомної енергетики [28, 29].

Проте не можна однозначно сказати, що воднева енергетика не здійснює ніякого впливу на навколишнє природне середовище. Це відбувається опосередковано, через видобування водню, виготовлення матеріалів для водневого автотранспорту наприклад і т.д.

При розгляді основних принципів водневої енергетики та її впливу на навколишнє середовище, не можна обмежуватися лише забрудненням повітря, так як це не єдиний тип забруднення. При порівнянні різних енергетичних джерел слід обговорити й інші аспекти. Під цим можна розуміти ефективність джерел енергії, тому важливо зіставити водневу енергетику з іншими енергетичними системами, такими як вугілля – синтетичне паливо, атомна енергія - водень, атомна енергія - електрика і ін.

З точки зору охорони навколишнього середовища варіанти водневої енергетики оцінюються вище старих енергетичних систем, що використовують копалини палива. Заслуговує на увагу той факт, що, хоча енергетична система сонячна система - водень найбезпечніша по відношенню до навколишнього середовища, все ж система сонячна енергія - електрика буде ефективніше, оскільки в ній використовується менша кількість матеріалів. Передбачається що система сонячна система - водень буде

працювати в поєднанні з фотогальванічними елементами, в яких витрачається велика кількість кремнію. Тому, якщо система море-сонце або з вітрової енергією, то вплив на навколишнє середовище буде менше, і енергетична система сонячна система водень буде більш прийнятною, ніж система сонячна система – електрика.

Найбільшого екологічного ефекту варто очікувати, якщо перевести на водень увесь транспорт великих міст. Адже саме там відбувається масоване забруднення навколишнього середовища. Тож оцінимо ситуацію, коли всі моторні палива, що споживаються у світі, вдалося б замінити на водень. Завдяки його енергоємності і більшому коефіцієнту корисної дії водневих приводів, порівняно з двигунами внутрішнього згоряння, водню в цьому випадку потрібно буде приблизно в 3,2 рази менше. Але щоб одержати за допомогою найсучасніших електролізних технологій водень, необхідний для заміни всіх моторних палив, треба, як мінімум, втричі збільшити виробництво електроенергії (таблиця 3.1). Підвищити електропотужності втричі доведеться тому, що залишаться як мінімум існуючі споживачі. Зрозуміло, це поки що не реальне завдання. Наведемо тільки один переконливий факт: 60 – 65% усієї світової електроенергії виробляють теплові електростанції, де спалюють горючі копалини (газ, мазут, вугілля тощо). І ці витрати істотно зменшити неможливо доти, доки не буде винайдено альтернативне джерело електроенергії, наприклад, термоядерний синтез. Можливо, згодом вдасться суттєво збільшити частку електроенергії, одержуваної від атомних станцій та поновлюваних джерел (сонячних батарей, вітрових установок тощо). Однак, окрім дешевої та доступної електроенергії, необхідні також промислові електролізери великої потужності, над розробкою яких працюють у багатьох країнах світу, але й донині ці проекти перебувають на стадії дослідно-конструкторських робіт.

Наступне важливе питання – глобальні викиди вуглекислого газу. Сьогодні внаслідок спалювання вуглеводневих моторних палив в атмосферу

Землі потрапляє майже 7 млрд тонн вуглекислого газу. Оцінимо, скільки ж його виділятиметься за найпростішим ланцюжком: мазут → електроенергія → електроліз (таблиця 3.2).

Таблиця 3.1. Оцінка світових ресурсів для переходу транспорту на водневе паливо шляхом електролізу води [27].

Всього споживається моторних палив (млн. тонн)	2200
Водневий еквівалент (млн. тонн)	680
Потреба в електроенергії для виробництва водню електролізом (млрд. кВт·год)	29700
Досягнутий рівень виробництва електроенергії (млрд. кВт·год)	15500

Таблиця 3.2. Сумарні світові показники викидів вуглекислого газу [27, 30].

Емісія вуглекислого газу в результаті:	Млн. т/рік
використання моторних палив (млн. тонн)	6900
переходу на водень методом електролізу (мазут → електроенергія → електроліз)	11200
переходу на водень паровою конверсією метану	5600

Із наведених даних бачимо, що «екологічно чиста» електролізна технологія призведе до катастрофічного погіршення екологічної ситуації на планеті – вуглекислого газу виділятиметься вдвічі більше! Щоправда, небажаний CO₂ можна утилізувати, наприклад, закачувати під землю до пластів геологічних формацій трьох типів: у свердловини, що залишилися від видобутих нафти й газу, у соленосні й вугільні шари, які втратили промислове значення. Такі технології за кордоном (поки що в обмежених масштабах) уже використовуються. Але для цього, знову-таки, треба спалювати вуглеводневе паливо: щоб рухати за допомогою електроенергії компресори, поруч має бути придатний підземний пласт, і ще слід забезпечити чимало інших умов. Очевидно, перспективніший шлях –

використання вуглекислоти як вихідної сировини для одержання корисних кисневмісних сполук.

Отже, перехід на водневе паливо найближчими десятиліттями зажадає зовсім іншого шляху – водневої переорієнтації нафто-, газо- та, можливо, і вуглепереробних галузей. Інакше кажучи, промисловість, яка сьогодні з горючих копалин виробляє моторні палива, повинна буде виробляти здебільшого водень – для потреб нової енергетики. Тоді ми зможемо очистити великі міста від забруднень, адже їх локалізують у тих місцях, де акумулюватимуть водень.

Водень рекламують як відмінне і екологічно чисте паливо, і він дійсно є таким. В результаті його згоряння утворюються водяні пари і ніяких парникових газів. Завдяки своїй атомарній масі він потенційно найкраще пальне.

Але, як водиться, це найкраще паливо не без недоліків. Почнемо з отримання водню. Головна проблема в тому, що водень в чистому вигляді в природі не зустрічається, і родовищ водню немає. Водень - це вторинне паливо, яке можна тільки зробити. Видатні фахівці в Росії з хімії гідридів, металлорганіческие і елементоорганічеської хімії професор Б. М. Буличов та професор П. А. Стороженко стверджують, що водень можна зробити дешевшим, ніж вуглеводневе паливо, шляхом піролізу вуглеводнів або електролізу води (основні способи отримання водню) . Вони вважають, що дешево водень можна отримувати тільки або шляхом термоядерної реакції або за допомогою біотехнологій, але ці технології існують більше на папері, ніж в металі.

Також абсолютно не відпрацьована технологія спалювання водню в паливних елементах. У лабораторних умовах це не становить проблеми, але в великих енергетичних установках, а тим більше в транспортних двигунах це являє велику проблему.

Найбільша проблема, яку можна порівняти за складністю з виробництвом водню, це його транспортування. Завдяки тій же самій масі він має властивість відмінно просочуватися через баки і ємності, через що в лабораторіях його зберігають у зв'язаному або зрідженому вигляді. Найчастіше це рідкий водень в спеціальних криогенних сховищах.

Важко собі уявити криогенні сховища для водню, що спалюється в великих енергетичних установках. Тоді зберігання палива буде за вартістю можна порівняти з ціною самого палива. І, нарешті, при зберіганні водню потрібно дотримуватися дуже велику обережність. Якщо водень просочиться з ємностей, то він утворює газоповітряну суміш, більш відому як «гримучий газ», займисту від найменшої іскри. Щоб побачити, що це таке, можна подивитися на хроніку загибелі дирижабля «Гінденбург», який згорів у лічені секунди.

Але тут буде ще більш серйозне становище, оскільки вибух гримучого газу відбудеться поруч з ємностями зрідженого водню, які, зрозуміло, здетонують. Займання гримучого газу може статися від чого завгодно: від замикання в електропроводці, від перегоріли лампочки, від потайки запаленою сигарети, або іскри, висіченим підковою. Якщо це буде велика енергетична установка, то потужність вибуху може обчислюватися десятками кілотонн тротилового еквівалента.

3.1 Вплив на атмосферне повітря

Мільйони тонн водню щороку розповсюджуються у всьому світу різними способами, але постачання водню окремим споживачам вимагає еволюції паливної інфраструктури.

Завдяки водневій енергетиці новий вид палива поступово приходить на зміну викопному паливу, яке спалюється у двигунах внутрішнього згорання і турбінах як основний метод перетворення хімічної енергії в кінетичну або

електричну енергію; таким чином викиди парникових газів і забруднення навколишнього середовища, спричинені такими двигунами, зменшаться.

Інтерес до водневої енергетики сфокусований головним чином на перспективі використання паливних елементів в автомобілях. Відношення потужності до ваги у паливних елементах може бути найкращим, вони набагато ефективніші, ніж двигуни внутрішнього згорання, до того ж не виробляють шкідливих відходів. Якщо буде впроваджено практичний метод зберігання водню, а вартість паливних елементів знизиться, вони можуть стати економічно конкурентоспроможними в порівнянні з автомобілями на гібридних паливних елементах/батареях або на звичайних двигунах. Економічна конкурентоспроможність транспортних засобів на паливних елементах зростатиме з ростом цін на вуглеводневе паливо, що використовується у двигунах внутрішнього згорання, адже легкодоступні резерви цих ресурсів майже виснажені, а також з огляду на штрафи за забруднення навколишнього середовища.

Водень виробляється або через електроліз води, або перетворенням викопного палива, останнім часом другий з цих методів був найпоширенішим. Перетворення викопного палива призводить до викидів вуглекислого газу в атмосферу. Аналогічно, при одержанні водню шляхом електролізу у генераторах на викопному паливі, утворюється вуглекислого газу, як і за прямого використання викопного палива. В залежності від методу виробництва водню та виду паливних елементів, можна досягти значної економії викидів вуглекислого газу завдяки ефективності останніх.

Хоча і використання відновлюваних ресурсів для одержання водню шляхом електролізу потребуватиме більших витрат енергії, ніж пряме використання цих ресурсів для живлення електромобілів, через додаткову стадію перетворення та втрати при транспортуванні, водень є придатнішим для запасання електрики. Він не потребує цінних матеріалів, як для

виготовлення батарей, та може бути запасений у великій кількості на випадок тимчасової відсутності сонця або вітру.

Як і будь-який двигун внутрішнього згоряння, ті, що працюють на водні, можуть виробляти оксиди азоту та інші забруднюючі речовини для навколишнього середовища. Викиди азотних сполук внаслідок роботи двигунів внутрішнього згоряння – першопричина утворення смогу. Саме тому вигідніше використовувати паливні елементи, які не мають ніяких інших викидів крім води.

Існують також деякі побоювання з приводу можливих проблем, пов'язаних з витоком водню. Молекулярний водень повільно витікає навіть з найгерметичніших ємностей. Припускають, що внаслідок витoku великого об'єму водню (H_2) через ультрафіолетове випромінювання можуть утворитись вільні радикали (H) в стратосфері. Ці вільні радикали діятимуть як каталізатори стоншення озонового шару. При достатньо великому збільшенні кількості водню в стратосфері з витоків H_2 процес стоншення озонового шару може пришвидшитись. Однак, вплив цих витоків може бути незначним. Кількість водню, що сьогодні витікає, набагато менша (десь у 10-100 разів), ніж передбачені деякими дослідниками дані про можливі 10-20%. Наприклад, у Німеччині витік водню становить лише 0,1%. Ймовірно, при використанні сучасних технологій такий витік становитиме не більше 1-2% навіть за поширеного вжитку водневих технологій.

Для повного технологічного циклу виробництва водню необхідні значні затрати енергії. Так, виробництво водню за допомогою електролізу води є споживачем електрики, яку найчастіше отримують при спалюванні мінерального палива(природного газу, вугілля тощо) на ТЕС. А, отже, повний процес виробництва водню може опосередковано спричиняти викиди вуглекислого газу.

Тим не менш, хоча воднева енергетика вважається екологічно чистою, необхідно розглянути і таку проблему як посилення глобального

парникового ефекту в результаті антропогенної діяльності при масовому виробництві та застосуванні водню, і вплив цієї діяльності на захисний озоновий шар Землі. За даними багатьох вчених, із 33,2 °С підвищення температури в приземному шарі атмосфери із-за парникового ефекту тільки 7,2°С зумовлено дією вуглекислого газу, а 26°С – парами води. Відомо, що при спаленні вуглеводневого пального, як і водневого, окисник -атмосферний кисень витрачається не тільки на утворення вуглекислого газу, але й водяної пари, що створює додатковий парниковий ефект в приземному шарі атмосфери. На думку геологів, в атмосферу Землі безперервно виділяється величезна кількість газоподібного водню без усякого антропогенного втручання. Тому роль втрат при промисловому виробництві, зберіганні й транспортуванні водню потребує якісного зіставлення з роллю його природного виділення, в тому числі й впливі на озоновий шар.

3.2 Вплив на ґрунти та водні ресурси

Додатковим стимулом вибору водню як енергоносія для автотранспорту є технологічний прорив, пов'язаний з освоєнням паливних елементів (ПЕ) як джерела електроенергії для електродвигуна, що використовується для переміщення автомобіля. У цьому випадку автомобілі на базі водню мають більш високу ефективність, тому що ККД паливного елемента сягає 60 % на відміну від ДВЗ у якого цей показник не перевищує 30 %. Крім того, водневий автомобіль із ПЕ є високоекологічним, тому що викидами є тільки водяна пара – сліди мастильних матеріалів і тверді частинки, що утворюються при зношуванні гальмових колодок і покришок.

Міграція водню як хімічного елемента відбуваються в усіх компонентах біосфери без винятку. В літосфері знаходяться запаси молекулярного водню, що виділяється в атмосферу при вулканічній діяльності, його також продукують деякі бактерії. Величезні маси водню, як і

кисню, беруть участь в круговороті води. Він входить до складу багатьох сполук як органічної так і неорганічної будови.

Воднева технологія використовується для автономного забезпечення різних видів наземного транспорту і рідководневих силових устаткувань для авіації, стаціонарних енергосистем з водневим акумулюванням енергії (вітрові, сонячні та інші види енергоприладів). Застосування водню в хімії, газо- і нафтохімії, виробництві мінеральних добрив, біотехнології, металургії і т.д. дозволить відмовитися від традиційної організації процесу, підвищити його якість і економічність при ліквідації повного або основного викиду забруднюючих речовин в атмосферу [31].

Технологія дасть можливість масштабно отримувати дешевий водень як цінної сировини і реагенту при виробництві добрив, метанолу, а також в процесах переробки нафти. Ресурси сировини практично необмежені. Водень є екологічно чистим енергоносієм і його застосування в енергетиці, промисловості та на транспорті матиме позитивний вплив на стан навколишнього середовища.

ВИСНОВКИ

Хоча водень є одним з найбільш поширених елементів у Всесвіті, в вільному стані він майже не зустрічається (в атмосфері він присутній в концентраціях менше 1 частини на мільйон). В основному водень знаходиться в зв'язаному стані у формі хімічних сполук, тому для широкомасштабного застосування він повинен бути витягнутий з них. Оскільки в процесах вилучення споживається значна кількість енергії, то водень слід розглядати не як джерело енергії, а як енергоносію. Крім того, в найближчому майбутньому він може стати середовищем для зберігання енергії, зокрема, електроенергії. Одне з його переваг засновано на тому, що майже будь-яке джерело енергії може бути конвертований в водень, даючи можливість його виробництва для локального використання в різних регіонах Землі.

В даний час загальна щорічне виробництво водню в світі складає близько 368,1012 м³ (за станом на 2008 р.) [32]. З цієї кількості близько 40% використовується в хімічній промисловості, 40% - на нафтопереробних заводах, а решта 20% - в різноманітних процесах, включаючи і використання водню як енергоносія [33].

Слід зазначити, що тільки 62% водню виробляється як цільовий продукт, інші 38% є побічним продуктом інших виробництв (нафтопереробка, коксохімія і т.п.). До таких належить майже весь електролітичний водень, одержуваний в даний час при виробництві хлору і каустичної соди.

Чим привабливі паливні елементи і чому їх немає на ринку? До достоїнств відносяться: високий ККД, низька токсичність, безшумність, модульна конструкція (маючи, скажімо, кіловатні паливні елементи, можна збирати з них установки великої потужності), різноманіття первинних видів

палива, широкий інтервал потужності. Проникнення їх на ринок стримується перш за все високою собівартістю по електроенергії і малим ресурсом. Найбільший ресурс у твердополімерних паливних елементів – 2 000 – 5 000 годин роботи, необхідний же термін служби – 20 000 – 30 000 годин.

Що стосується комерціалізації електрохімічних генераторів на паливних елементах, то близько 100 компаній бере участь у їх демонстраційних випробуваннях, досягнута встановлена потужність в 50 МВт. Потреба децентралізованої стаціонарної енергетики (потужність електрохімічних генераторів від 5 кВт до 10 МВт) - 100 000. МВт за 10 років. Зараз 1 кВт встановленої потужності коштує більше 3 тис. дол, прийнятна ціна - \$1000. Потреби автотранспорту в електрохімічних генераторах на паливних елементах (потужність 15-100 кВт) – 500 000 штук на рік. Зараз вартість одного такого генератора більше \$3 000, прийнятна ціна - \$50-100. Таким чином, необхідно багаторазове зниження вартості стаціонарних паливних елементів і десятиразове – вартості паливних елементів для транспорту [34].

Водень можна вважати паливом майбутнього. У багатьох країнах світу дослідження з водневої енергетики є пріоритетними напрямками розвитку науки. Вони забезпечуються фінансовою підтримкою і держави, і бізнесових структур. Основною метою розвитку водневих технологій є зниження залежності від традиційних енергоносіїв – нафти, газу і вугілля. Ключовою умовою переходу до водневої енергетики є пошук і створення надійних та економічно доцільних паливних елементів на основі водню.

В умовах зростаючого світового попиту на енергетичні ресурси, вичерпання викопних видів палива та зростаючого рівня забруднення довкілля необхідним є ефективний пошук нових (альтернативних) енергетичних технологій, які б забезпечували прийнятний рівень забруднення і одночасно сприяли економічному зростанню країни.

Воднева енергетика є саме таким напрямом, який завдяки високій технологічності та наукоємкості дозволить вийти на рівень розробок

енергоефективних та екологічно чистих технологій майбутнього (XXI століття).

Для України водень є перспективним паливом, яке в майбутньому, в умовах жорсткого дотримання вимог техніки безпеки, може замінити вуглеводневі джерела енергії та зменшити рівень енергетичної залежності країни, реалізація цього напряму є тривалим процесом, тому її потрібно починати вже сьогодні.

Основним завданням при цьому є забезпечення достатньо високої ефективності виробництва і зберігання водню та розробка конкурентоспроможних енергоустановок з його використання.

Використання традиційних видів палива веде до суспільних втрат, забруднення навколишнього середовища та змін клімату. В свою чергу в результаті змін клімату виникають такі екологічні проблеми як кислотні дощі, парниковий ефект, підняття рівня Світового океану, смоги та ін. Воднева енергетика прямого впливу на навколишнє природне середовище не здійснює. Це відбувається опосередковано, як приклад, через виробництво автомобільних елементів, які необхідні для експлуатації автотранспорту на водневому паливі.

Воднева енергетика є саме таким напрямом, який завдяки високій технологічності та наукоємкості дозволить вийти на рівень розробок енергоефективних та екологічно чистих технологій майбутнього (XXI століття).

Для України водень є перспективним паливом, яке в майбутньому, в умовах жорсткого дотримання вимог техніки безпеки, може замінити вуглеводневі джерела енергії та зменшити рівень енергетичної залежності країни, реалізація цього напряму є тривалим процесом, тому її потрібно починати вже сьогодні.

Основним завданням при цьому є забезпечення достатньо високої ефективності виробництва і зберігання водню та розробка конкурентоспроможних енергоустановок з його використання.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Global Energy Statistics // Enerdata Publication, 2012. [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.enerdata.net/enerdatauk/press-and-publication/energy-press-releases/sluggish-growth-world-energy-demand-in-2011.php> (дата звернення: 12.01.2017).
2. Тарасов Б. П., Лотоцкий М.В. Водородная энергетика: прошлое, настоящее, будущее // Рос. хим. журн. – 2006. – **50**, № 6. – С. 5 – 18. 18.
3. Jain I. P. Hydrogen fuel for 21st century // Int. J. Hydrogen Energy. – 2009. – 34, No. 17. – P. 7368 – 7378.
4. Под ред. акад. Ю. Д. Третьякова Неограниченная химия. Том 2. Химия непериодических элементов. – Москва : Академия, 2004. – 368 с. – ISBN 5-7695-1436-1.
5. Actual Worldwide Hydrogen Production from ... Arno A Evers. December, 2008. <http://www.webcitation.org/6HZFACyUL>
6. Hydrogen technologies. [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.interstatetraveler.us/Reference-Bibliography/Bellona-HydrogenReport.html> (дата звернення: 16.01.2017).
7. Development of Solar-powered Thermochemical Production of Hydrogen from Water. [Электронный ресурс]. – URL: https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review05/pd28_weimer.pdf (дата звернення: 16.01.2017).
8. Иванчев С. С., Мякин С. В. Полимерные мембраны для топливных элементов: получение, структура, модифицирование, свойства // Успехи химии. – 2010. – **79**, No. 2. – С. 117 – 133.
9. Ю.В. Сняк. Перспективы применения водорода в системах децентрализованного электро- и теплоснабжения. Рос. хим. журн. – 2008. – № 3. – С. 41–48.

10. Иванчев С. С., Мязин С. В. Полимерные мембраны для топливных элементов: получение, структура, модифицирование, свойства // Успехи химии. – 2010. – **79**, No. 2. – С. 117–133.
11. Шевченко В. В., Клепко В. В. Термостабільні протон-провідні мембрани для паливних елементів // В: Фундаментальні проблеми водневої енергетики. – Київ: Видавництво «КІМ», 2010. – С. 361–384.
12. Crabtree G. W., Dresselhaus M. S., Buchanan M. V. The hydrogen economy. // Phys. Today. – 2004. – **57**, No. 12. – P. 39–44.
13. Cryogas International. [Електронний ресурс]. – URL: <http://www.cryogas.com/feature> (дата звернення: 12.12.2016).
14. Prospects for hydrogen and fuel cells. Energy Technology analysis. International Energy Agency, 2005. [Електронний ресурс]. – URL: <http://ieahia.org/Activities/Subtask-A,-Hydrogen-Resouce-Study-2008,-Resource-S/2005-IEA-Prospects-for-H2-and-FC.aspx> (дата звернення: 19.12.2016).
15. Тарасов Б. П., Лотоцкий М.В. Водородная энергетика: прошлое, настоящее, будущее // Рос. хим. журн. – 2006. – 50, № 6. – С. 5 – 18. 18.
16. Jain I. P. Hydrogen fuel for 21st century // Int. J. Hydrogen Energy. – 2009. – 34, No. 17. – P. 7368–7378.
17. Соловей, В. В. Ризики техногенно-екологічного характеру при експлуатації об'єктів автотранспортної інфраструктури [Текст] / В. В. Соловей, А. В. Гриценко, Н. В. Внукова // Экология и промышленность. – 2011. – № 3 (28). – С. 37–40.
18. Васильєв, А. Й. Використання гелію-та вітроенергетичних комплексів для зниження техногенного навантаження в рекреаційних зонах [Текст] / А. Й. Васильєв, І. Емрі, М. М. Зіпунніков та ін. // Вісник Інженерної академії України. – 2014. – Вип. 1. – С. 209–214. 14.
19. Naegeli, D. M. Effects of fuel properties un soot formation in turbine combustion [Text] / D. M. Naegeli, C. A. Moses // Jbid. – 1991. – Vol. 781026. – P. 3–9.

20. Синяк, Ю. В. Прогнозные оценки стоимости водовода в условиях его централизованного производства [Текст] / Ю. В. Синяк, В. Ю. Петров // Проблемы прогнозирования. – 2008. – № 3. – С. 41–48.
21. Таеко, Sano NO_x formation in laminar flames [Text] / Sano Taeko // Combustion Science and technology. – 1992. – Vol. 29. – P. 261–275. 17.
22. Caton, J. A. Detailed results for nitric oxide emissions as determined from a multiple – zone cycle simulation for a spark-ignition engine [Text] / J. A. Caton // Proceedings of 2002 Fall Technical Conference of the ASME – ICED (New Orleans, 8-11 Sept. 2002): Sheraton New Orleans, 2002. – P. 1–18.
23. Actual Worldwide Hydrogen Production from ... Arno A Evers. December, 2008. – URL: <http://www.webcitation.org/6HZFACyUL> (дата звернення: 20.12.2016).
24. H2Mobility: Hydrogen Vehicles. – URL: <http://www.h2mobility.org> (дата звернення: 20.12.2016).
25. Hydrogen technologies. – URL: <http://www.interstatetraveler.us/Reference-Bibliography/Bellona-HydrogenReport.html> (дата звернення: 20.12.2016).
26. Ukrainian Association for Hydrogen Energy. – URL: <http://uahe.net.ua/uk/articles-ua/321-nespodivaniy-rezultat-zajmannya-vodneвого-avtomobilya.html> (дата звернення: 20.12.2016).
27. Мордков В.З. Материалы Международного форума по водородным технологиям для производства энергии (6 – 10 февраля 2006 г.). – М.: РУСДЕМ- Энергоэффект, 2006. – 122 с.
28. Development of Solar-powered Thermochemical Production of Hydrogen from Water. – URL: https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review05/pd28_weimer.pdf. (дата звернення: 20.12.2016).
29. Crabtree G. W., Dresselhaus M. S., Buchanan M. V. The hydrogen economy. // Phys. Today. – 2004. – **57**, No. 12. – P. 39–44.
30. Степанов А.В., Кухарь В.П. Достижения энергетики и защита окружающей среды. – Киев: Наук. думка, 2004. – 206 с.

31. Arno A. Evers FAIR-PR. Fair-pr.de – URL: <http://www.webcitation.org/6HZFACyUL>. (дата звернення: 30.12.2016).
32. Leeds researchers fuelling the ‘hydrogen economy’. University of Leeds. 2007-11-26. – URL: <http://www.webcitation.org/6Hmz22Tuk> (дата звернення: 10.01.2017).
33. Hannesson, Hjálmar W. (2007-08-02). Climate change as a global challenge. Iceland Ministry for Foreign Affairs. – URL: <https://www.mfa.is/news-and-publications/> (дата звернення: 18.01.2017).
34. Асланин Г.С. Проблематичность водорода в плане замещения нефти./ Энергетическая политика, вып.2, -2006, с. 42-51.