

УДК 662.769.2

Ю.М.Запорожець, канд.техн.наук (Ін-т відновлюваної енергетики НАН України, Київ)

До питання про інтеграцію ресурсів відновлюваної енергії з традиційними системами енергозабезпечення України і ключову роль електролізу води

У статті проаналізовано проблемні питання і надано обґрунтування технологічної схеми інтеграції відновлюваної енергетики України з традиційними системами енергозабезпечення, яка гармонійно поєднує їхні переваги і нівелює недоліки, створюючи передумови для побудови глобальної інтегрованої енергосистеми. Визначено головну ланку цієї схеми – електроліз води та підстави для його інтенсифікації, в тому числі нетрадиційними методами. Показано технологічну можливість і наявність достатніх ресурсів для створення в Україні конкурентоспроможної водноенергетичної галузі економіки.

В статье проанализированы проблемные вопросы и представлено обоснование технологической схемы интеграции возобновляемой энергетики Украины с традиционными системами энергообеспечения, которая гармонично сочетает их преимущества и нивелирует недостатки, создавая предпосылки для построения глобальной интегрированной энергосистемы. Определено главное звено этой схемы – электролиз воды и основания для его интенсификации, в том числе нетрадиционными методами. Показана технологическая возможность и наличие достаточных ресурсов для создания в Украине конкурентоспособной водородноэнергетической отрасли экономики.

Вступ. Невпинне зростання енергоспоживання в усіх сферах людського буття фактично є запорукою надійного добробуту розвиненого суспільства. Проте зворотнім боком поступу до зміцнення енергетичної безпеки і, як виявилось, у глобальному вимірі дуже загрозливим, стало прискорене накопичення викидів оксидів вуглецю, азоту та інших токсичних і шкідливих для природного середовища речовин. Дієвим шляхом зниження їх обсягів стає використання відновлюваної енергії, яке у багатьох країнах, особливо у Європі, США і Китаї, набуло значних масштабів і продовжує динамічно поширюватись [1–4].

Однак найбільш значущі, з погляду на наявний потенціал і технологічну доступність, види відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), що постійно відтворюються в природних процесах, такі як вітер, хвилі та сонячне випромінювання, мають певні вади – переривчастість і нестабільність. Тому при застосуванні установок відновлюваної генерації (УВГ) для локального енергопостачання тих чи інших категорій споживачів у певні періоди виникає потреба залучати із загальної мережі об'єднаної енергосистеми (ОЕС) потужності інших операторів, які виробляють енергію зі спалюваних ресурсів, у тому числі – природного газу. Разом з тим, внаслідок звичайних добових та сезонних коливань споживання під час спаду локального

навантаження УВГ можуть виробляти надлишок енергії, який через ту ж саму мережу диспетчерською службою ОЕС передається на ті ділянки (РЕМ – райони електричних мереж), де споживачі її потребують. Але в разі масштабного впровадження потужностей відновлюваних джерел профіцит (надлишок) енергії може сягнути деякого критичного рівня, коли, з огляду на обмежену пропускну здатність мережі, виникає необхідність її збереження у достатньо великих обсягах [5–7].

Відомо, що існують різні засоби зберігання енергії, як в електричному (електрохімічному), так і в перетвореному вигляді, серед яких найбільш придатним для "консервації" саме відновлюваної енергії вважається виробництво водню шляхом електролізу води [6–8]. Використання водню в якості енергоносія з метою акумуляції і транспортування енергії уявляється ефективним рішенням проблеми стабільного енергопостачання за рахунок відновлюваних джерел. Більше того, провідні фірми вважають водень своєрідним "спільним знаменником" відновлюваної енергії з традиційними системами енергозабезпечення (ТСЕ), здатним забезпечити їх інтеграцію і шлях до майбутньої "чистої" енергетики [7–10]. Втім, природно, що на цьому шляху чимало "підводних каменів", і перш за все – вартість водню, а також інших, більш чи менш складних проблем,

вирішення яких повинне створити сприятливі умови для інвестицій у цю сферу та її гармонійне технологічне спряження з існуючою глобальною енергетичною інфраструктурою.

Для цього необхідно визначити основні напрямки здійснення технологічних заходів щодо забезпечення природного та безперешкодного процесу "вбудови" атрибутів відновлювано-водневої енергетики (ВВЕ) в усталену конструкцію ТСЕ. Вирішення зазначеного завдання полягає, очевидно, у зіставленні провідної парадигми кожної з систем, виявленні їхніх переваг і недоліків, а головне – суперечних властивостей, які, власне, й складають основний зміст проблемних питань на шляху створення глобальної інтегрованої (ще кажуть – гібридної) енергетичної системи.

Метою даної статті є обґрунтування технологічної схеми масштабної інтеграції ресурсів відновлюваної енергії до глобальної енергетичної системи України за допомогою технічних засобів традиційних схем енергопостачання, в якій ключову роль відіграє електроліз води, і визначення заходів щодо підвищення його ефективності.

Проблемні питання інтеграції ВВЕ з ТСЕ.

ТСЕ сформувалась як системна реалізація принципу: генерувати енергію там і тоді, де це доцільно, і надавати її споживачам, де і коли потрібно. Технологічними засобами забезпечення цього принципу стали три глобалізованих кола циркуляції енергетичних потоків, з'єднані різноманітними зв'язками: об'єднаної електроенергетичної системи (ОЕС), системи комунальних теплофікаційних мереж (СКТМ) та газотранспортної системи (ГТС) з відгалуженнями та паралельними ланками – назвемо їх разом ГСЕ, тобто "глобалізована система енергозабезпечення", використовуючи цей термін замість "ТСЕ". Створення такої схеми явилось результатом природної закономірності підвищення енергетичної та економічної ефективності технічних засобів шляхом укрупнення одиничних об'єктів та поєднання їх виробничих потужностей. Власне, її побудова стала вирішальним фактором досягнення безперебійності постачання і сталих уніфікованих параметрів енергії, що по суті втілює зміст енергетичної безпеки в цілому. На рис. 1 в узагальненому вигляді представлено існуюча схема ГСЕ.

Однак та сама властивість, що в одних умовах є перевагою, в інших обертається вадою. Надійно

справляючись з навантаженням в усталених режимах, тобто – з базовою генерацією, ГСЕ внаслідок інерційності основних генеруючих потужностей (принаймні вітчизняна, яка обтяжена застарілими низькоефективними теплосиловими установками [11, 12]) у динаміці (короткочасних коливаннях навантаження) поступається маневреним станціям з газотурбінними установками і парогазовим циклом (ГТУ і ПГУ) [13, 14]. З іншого боку, в разі довготривалих відхилень навантаження, пов'язаних із сезонними змінами попиту на енергію, ГСЕ, у відповідь на його зимове зростання забезпечує збільшення генерації за рахунок ГТС-кола, проте вона в принципі нездатна на зворотню дію – влітку "повернути" енергію до ГТС, тобто забезпечити її акумулювання для використання у наступних періодах. Хоча саме ГТС є неповторним за своєю ємністю і технологічними якостями засобом завчасного накопичення первинних енергоносіїв у підземних газосховищах та паралельних нитках нафтопроводів [15] (акумулювання "ante factum").

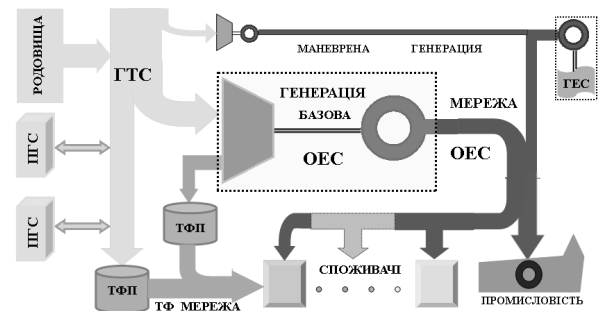


Рис. 1. Схема ГСЕ: ПГС – підземні газосховища; ГТС – газотранспортна система; ТФП – теплофікаційні пункти (станції); ГЕС – гідроелектростанції.

На відміну від ГСЕ, відновлювана енергетика втілює протилежну парадигму: "пожинати" енергію (harvest energy) там і тоді, де вона з'являється, і надавати її споживачам, де і коли можливо. Тому природно, що переважна більшість УВГ і навіть їх найбільші агломерації у вигляді офшорних вітропарків (у Німеччині, Великобританії) чи сонячних ферм незіставні за потужністю з можливостями ГСЕ, а значить, їхня енергія, по більшості, не відповідає вимогам щодо безперебійності постачання і сталих параметрів. Хоча загальна встановлена потужність сукупності європейських, наприклад, офшорних ВЕС (вітрових електростанцій) сягає кількох ГВт і вже перевищує потужності енергосистем деяких із цих країн [4], але безпосе-

редне об'єднання згаданих ВЕС за зразком ОЕС з огляду на природні (морські) фактори не представляється реальним. Разом з тим, УВГ у порівнянні з об'єктами ГСЕ майже неперевершені за швидкістю темпів спорудження, рівнем питомих капітальних вкладень, а головне – "чистотою" енергії.

З цього, власне, й випливає уявлення про "спільний знаменник" – проміжний або *вторинний* енергоносіє, роль якого за загальним визнанням надається водню. Але одразу варто зауважити, що отримання водню за рахунок традиційних джерел електричної енергії практично невиправдане, за виключенням надлишку генерації атомних та гідроелектростанцій. Тому водень у призначеній йому ролі засобу акумулювання виробленої енергії (акумулювання "post factum") треба сприймати як продукт саме відновлюваної енергетики, тобто в системі ВВЕ.

Технологічна схема вживання відновлюваної енергії у системі ВВЕ уявляється у вигляді ланцюга з п'яти послідовних операційних ланок (стадій), кожна з яких передбачає вирішення певних проблем.

Перетворення енергії відновлюваних джерел в уживані види енергії – електрику чи теплоту; можливо й механічний рух, але такий варіант майже не використовується.

Головні проблеми на цій стадії обумовлені невеликою потужністю окремих УВГ (у масштабі ГСЕ) та їх розпорошеністю, адже кожна установка потребує пошуку придатної ділянки, її облаштування, спорудження окремих чи додаткових ліній електропередач, пристроїв узгодження параметрів отриманої енергії з характеристиками її приймачів та ін., що в сукупності суттєво стримує зниження вартості отриманої енергії та її конкурентоздатності. Безпосередня реалізація такого підходу в узагальненому вигляді представлена схемою, що наведена на рис. 2.

Отримання водню: за рахунок електрики водень отримують переважно шляхом електролізу

води, а за рахунок теплоти – газифікацією сировини з вуглеводневим вмістом, у тому числі рослинної (біопалива). Головні проблеми – енергоємність технологічного процесу, складові витрати і собівартість водню (ціна) відповідно до обраної технології його отримання.

В даному дослідженні розглядається лише електроліз води, хоча другий варіант не виключається (наприклад, при використанні ВДЕ іншої природи).

Зберігання водню – найгостріше проблемне питання в технології ВВЕ, яке обумовлене специфічними властивостями самого водню та його взаємодії з різноманітними матеріалами. Проблематика полягає у виборі форми зберігання, тобто агрегатно-хімічного стану і його параметрів, які у значній мірі пов'язані з кінцевою стадією використання водню, а також відповідних технічних засобів забезпечення належного режиму зберігання і відновлення стану водню [5, 16]. Для сучасних і навіть перспективних технологій зберігання по більшості характерна відносно низька питома щільність запасеної у масі водню енергії у порівнянні з деякими іншими способами і формами її акумулювання. Особливо це стосується стаціонарних установок для зберігання великих обсягів газу типу ресиверів, газгольдерів або мобільних ємностей – цистерн і танків. Звичайно, що і вартість зберігання водню при цьому виявляється досить високою.

Транспортування водню. Його особливості цілком пов'язані з формою зберігання, і в разі, коли йдеться про транспортування ємностей чи контейнерів з воднем, проблемних ситуацій, крім забезпечення безпеки переважно не виникає. Специфічні проблеми з'являються при транспортуванні водню в газоподібному стані за допомогою трубопровідних систем: підбір спеціальних матеріалів, особливі вимоги до конструкції труб, з'єднань, ущільнень і т.п., що знову ж таки відбивається на кінцевій вартості водню.

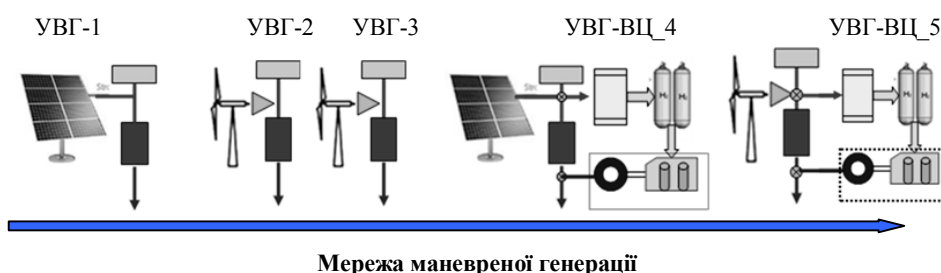


Рис. 2. Існуюча схема підключення УВГ з простим (УВГ-1...УВГ-3) і водневим циклом (УВГ-4, УВГ-5).

Відтворення енергетичного вмісту водню. Зворотний процес отримання енергії з водню може бути здійснений лише двома шляхами – електрохімічним перетворенням у паливних елементах (електрохімічних генераторах – ЕХГ) у вигляді електрики, або спалюванням його в теплових двигунах чи апаратах для генерації електричної енергії або теплоти.

Існує третій шлях – подальше хімічне перетворення водню: синтез метанолу, моторного палива та інших продуктів, придатних для використання переважно на транспорті [17], але це окреме відгалуження від системи енергопостачання, яке в контексті даної статті не розглядатиметься.

Головним питанням у цих технологіях є загальний коефіцієнт "корисної дії" – енергетичної та економічної ефективності водневого циклу.

Стосовно паливних елементів слід зазначити достатньо високий рівень їхньої енергетичної ефективності – до 70%, але надійні промислові технології для виробництва потужних ЕХГ для великої енергетики поки що не відпрацьовані, хоча інтенсивна робота з їх удосконалення дає підстави очікувати появи конкурентоздатних апаратів уже в найближчому майбутньому.

Разом з тим, уживання енергетичного вмісту водню шляхом його спалювання докладно проаналізовано в [14, 18, 19], де показана можливість його використання в промислових масштабах безпосередньо або в суміші з іншими нетрадиційними видами палива (синтез-газом) та природним газом в ГТУ-ПГУ енергокомплексах для маневрної генерації в складі ОЕС. ККД таких енергоустановок сягає 60% й існують достатньо ґрунтовні передумови для його подальшого збільшення і доведення до рівня ККД гідроакumuлюючих станцій (ГАЕС). Економічно прийнятним виявляється і застосування водневого циклу в паротурбінних АЕС [20], а також воднево-кисневих парогенераторах у паротурбінних установках базової генерації [21]. У поєднанні з когенерацією для постачання енергії у теплофікаційні мережі [22, 23] зазначені засоби забезпечують майже повне використання енергетичного вмісту водню.

Таким чином, п'ята, заключна ланка існуючого технологічного ланцюга ВВЕ в зазначеному варіанті представляє пряму форму стикування (спряження) з ГСЕ і в контексті цього аналізу

може вважатися вже вбудованою у глобальну систему (що не означає, однак, її завершеності та перспектив подальшого удосконалення).

Так само й перша ланка – вироблення електричної енергії з ВДЕ і віддача її у загальну електричну мережу ГСЕ – є прямим спряженням двох систем, хоча, як зазначено вище, суттєвою вадою пануючої схеми є велика кількість дрібних джерел, синхронізувати роботу яких для об'єднання у потужні масиви генерації на відстанях у кількості кілометрів технічно складно й економічно неефективно.

Проте три проміжних ланки системи ВВЕ взагалі існують нібито відокремлено від спільної схеми й залишаються, так би мовити, наодинці зі своїми специфічними проблемами, що цілком і повністю обумовлено своєрідною парадигмою відновлюваної енергетики. Звідси випливає постановка головного завдання побудови інтегрованої глобальної енергетичної системи (ІГЕС) – змінити цю парадигму і пристосувати її до глобалізованої схеми.

Принципи і передумови побудови та основні складові ІГЕС. Вирішенню проблем, що викликані суперечливими вимогами або критеріями, як правило, вдало слугують відомі принципи чи правила так званої "ТБВЗ" – Теорії Вирішення Винахідницьких Задач (російською – ТРИЗ) [24]: перетворити об'єкт, який створює протиріччя, в інший фізичний (матеріальний) стан або перекласти ("доручити") виконання його функцій іншим елементам системи.

Ситуація, що розглядається, наскрізь складається із суперечливих завдань, тому природно скористатись такою методою для формування нового змісту технологічних ланок ВВЕ-ланцюга.

Отже, первинна генерація електричної енергії містить протиріччя між дрібним характером виробітку і значним загальним її обсягом, який в існуючому фізичному вигляді технологічно непридатний для створення потужних енергетичних потоків та їх "вливання" в глобальну систему енергопостачання. Вирішення протиріччя полягає у перетворенні електрики безпосередньо на місці її генерації в інший матеріальний стан – водень, з'єднання обсягів якого у довільних масштабах не представляє проблем. Значущим фактором у цьому перевтіленні є й той факт, що транспортування енергії у вигляді водню на відстані більше 100 км

стає вигіднішим, ніж самої електрики [5].

Які підстави чи передумови існують для застосування саме такої форми кінцевого продукту відновлюваної генерації? Раніше, у циклі робіт [25–28] була обґрунтована система виробництва водню в промислових масштабах на морських плавучих платформах з вітро-сонячними енергетичними установками в акваторіях шельфу України та логістична схема його транспортування до наближених терміналів і подальшої доставки споживачеві. Показано, що енергетичний потенціал швидкості вітру на висоті 50 м із середньою щільністю 600-900 Вт/м² та сонячного випромінювання на рівні 1300-1500 кВт·год/(м²·рік) в зоні чорноморсько-азовського шельфу при використанні лише 1% його площі від загальних 70 тис. кв. км може забезпечити не менше 60 ГВт встановленої потужності УВГ з річним виробітком 120 млрд кВт·год електричної енергії, обсягу якої достатньо для виробництва майже 25 млрд м³ водню. Там же підкреслено, що вихід на морський простір для видобутку водню за рахунок відновлюваних джерел енергії та необмеженого ресурсу сировини (води) знімає усі питання та клопіт щодо земельних ділянок під УВГ, водокористування та екологічних обмежень і забезпечує зіставний рівень витрат на улаштування плавучих платформ та опорних конструкцій вітрових і сонячних енергоустановок.

Таким чином, перша технологічна ланка ВВЕ, зорієнтована на видобуток водню в промислових масштабах, перетворюється на попередню стадію другої ланки і в ланцюгу ВВЕ фактично поєднується з нею. В результаті технологічний ланцюг ВВЕ позбавляється маси проблем, пов'язаних із проміжним, як правило, двоступеневим перетворення первинної форми електроенергії, забезпеченням вимог стандартів щодо її якості, електромагнітною сумісністю і т.п., котрі в дуже значній мірі підвищують собівартість товарного продукту – тієї електроенергії, що надходить у мережу.

Друга ланка є ключовою в усій схемі, тому що саме в процесі отримання водню електролізом води формуються вирішальні економічні характеристики енергетичного продукту, який отримують споживачі. Надалі цій темі буде присвячено окремий розгорнутий розгляд, але попередньо доцільно

визначитися з двома наступними, пов'язаними між собою ланками руху енергії до споживача.

Безліч проблем щодо зберігання та транспортування водню існує лише до того моменту, коли потрібно відтворити його енергетичний вміст. А такий момент настає тоді, коли, як уже зазначено при розгляді заключної ланки технологічного ланцюга ВВЕ, водень у суміші з природним або іншими газами подається до камер згоряння ГТУ чи то котлів парогенераторів на електростанціях ОЕС. При цьому пропорційний склад суміші може бути практично довільним, наприклад, в [19] стале функціонування ГТУ при змінах навантаження від 100 до 20% забезпечувалось подачею паливної суміші природного газу й синтез-газу (з воднем) у пропорції, яка варіювалась у діапазоні 10÷90 об'ємних відсотків (за витратою).

Однак виникає питання: чи обов'язково приготування такої суміші повинне відбуватись перед камерою згоряння, куди природний газ надходить прямо з газогону, яким він і транспортується, і зберігається, в той час як водень потрібно доставляти окремо? Насправді не існує ніяких перешкод для того, щоб суміш утворювати ще в газогоні, в який можна закачувати водень у тому місці, де його й отримують, навіть на значних відстанях від розташування генеруючих установок.

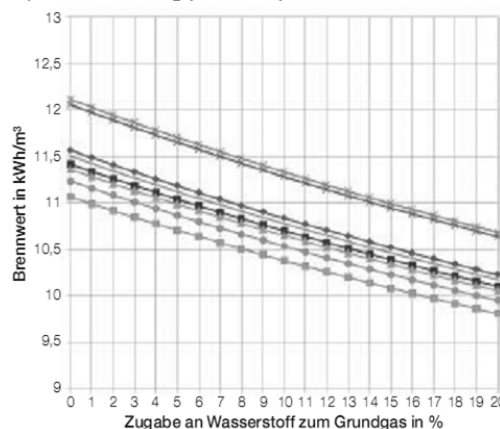


Рис. 3. Залежність теплоти згоряння від складу суміші водню з природним газом із різних джерел.

У Німеччині вже проводяться дослідження стосовно прямого закачування водню у газопроводи і впливу його відносного вмісту на споживчі властивості отриманої суміші; на рис. 3, наприклад, наведені графіки впливу концентрації водню на теплоту згоряння суміші. Принаймні певний час там діяли нормативні обмеження на вміст водню в системах громадського газопостачання на рівні

12 об. %, які в подальшому були скасовані, але орієнтовно допускається вміст водню до 10 мол. %. Крім того анонсовано спорудження й випробування двох дослідно-промислових (demonstration plant) вітро-водневих установок з електролізером потужністю 250 кВт, орієнтованих на комерційне впровадження [7, 29]. Схожий проект започатковано в Австрії [30], де застосована фотоелектрична установка для отримання водню шляхом електролізу води і подачі його у газову мережу через газозмішувальний пристрій, який забезпечує однорідність суміші газів (показаний на рис. 4).

Обсяги закачування водню контролюються відповідними лічильниками. Проекти подібного кшталту отримали розголос як новітня технологія "Power-to-Gas solution" (P2G), або "Power-to-pipeline" для збереження надлишкового виробітку енергії з відновлюваних джерел. Одночасно наголошується, що P2G надає унікальні можливості для поєднання величезного потенціалу відновлюваних альтернативних джерел генерації (vast renewable potential of alternative generation sources) з неперевершеною ємністю і гнучкістю зберігання енергії (unparalleled energy storage capacity and flexibility) систем природного газу.

Отже, керуючись принципами "ТРИЗу", доцільно скористатись виявленою передумовою для повного зняття проблем зберігання та транспортування водню шляхом перекладення цих функцій на існуючі засоби – трубопроводи й підземні сховища ГТС. ГТС України представляє унікальну за своїми характеристиками технічну систему, короткі дані про яку наведено нижче:

- загальна довжина газопроводів 38,55 тис. км, в т.ч. газопроводів-відводів 16,39;
- пропускна здатність газотранспортної системи: на вході/на виході 287,7/178,5 млрд м³/рік;
- загальна активна ємність підземних газосховищ (ПГС) 31 млрд м³.

Зазначені дані показують, що той річний обсяг водню, який, за попередньою оцінкою, може бути вироблений на шельфі України, з урахуванням його компримування (стиснення до робочого тиску газопроводу), що називається, "з головою" сховається в ПГС і трубах ГТС, не перевищуючи згаданих вище рекомендованих пропорцій.

Визначившись відносно способу подолання проблем зберігання й транспортування водню в масштабах млрд кубічних метрів, ми прийшли до

схеми повної інтеграції усіх ланок відновлювано-водневої технології з ГСЕ, починаючи від електролізних комірок, з яких отримується водень. Схема складається з функціонально уніфікованих УВГ-ВЦ, які, на відміну від схеми рис. 2, під'єднуються до трубопроводів системи газопостачання. В результаті вона набуває вигляду, наведеного на рис. 5.

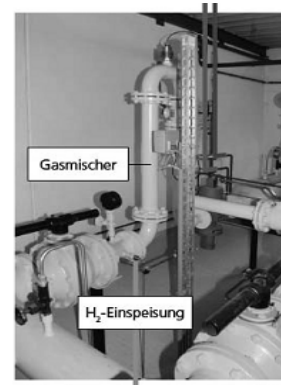


Рис. 4. Вузол подачі водню через газозмішувач до газопроводу природного газу.

Особливо сприятливим фактором для реалізації такої схеми є можливість сполучення з ГТС цілого парку енерговодневих комплексів на морських плавучих платформах, розгорнутих на шельфі України до траверсу "о. Зміїний – Євпаторія", через існуючі газопроводи від морських родовищ "Голіцинське" і "Штормове" (на рис. 6 виділено пунктиром).

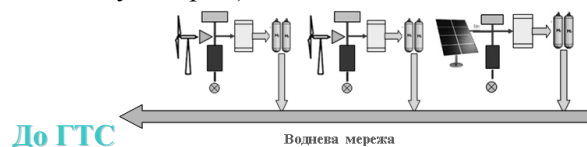


Рис. 5. Нова схема ВВЕ.

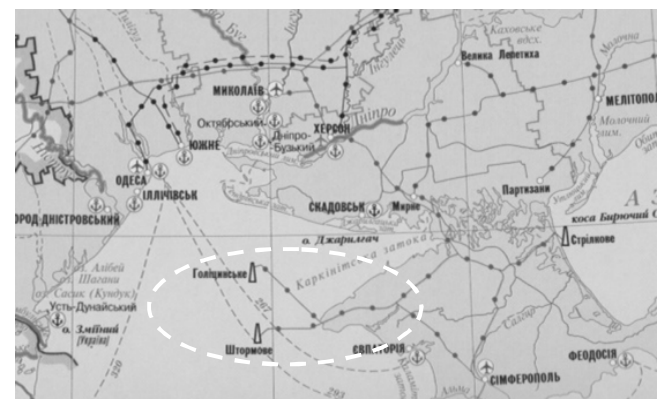


Рис. 6. Існуючі нитки газопроводів для закачування водню з морських платформ.

Ключова роль електролізу води. Водень не зустрічається на Землі у вільній формі, а перебуває у зв'язаному стані в різних сполуках. Для вивільнення з них водню необхідні відповідна енер-

гія і якийсь процес виробництва, витрати на який становлять більшу частину кінцевої ціни водню. Тому вкрай актуальним завданням є підвищення енергетичної ефективності електролізу й економичності його апаратної реалізації.

Електролиз води відомий півтора століття, проте лише найсучасніші технології і спеціальні матеріали дозволили досягти близьких до граничних значень показників питомої споживаної енергії традиційного процесу електролізу: при високо-температурному режимі близько $3,6 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^3$, при звичайній температурі в лужних електролізерах з протонобмінною мембраною (PEM) $4,1 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^3$. Менші енерговитрати можливі лише в технологіях із закритим термохімічним циклом при наявності значного надлишку тепла (наприклад, на атомних електростанціях) [5, 10].

Отже, найвужчим місцем на шляху поширення відновлювано-водневої енергетики, або гордіїв вузол, як назвав його автор [31], виявився енергетичний бар'єр – питома споживана енергія електролізу. Тому останнім часом цій проблемі у всьому світі присвячується багато досліджень.

Цілеспрямована робота щодо вдосконалення традиційних систем електролізу проводиться у відомих наукових центрах [32, 33]. Але чимало дослідників, передбачаючи досягнення фізичної межі їхньої ефективності, звернулись до нетрадиційних методів отримання водню з води, які інтенсивно опрацьовують, розраховуючи на можливість якісного технологічного прориву. В результаті наразі намітилося кілька основних напрямків розробок щодо підвищення енергетичної ефективності і здешевлення електролізного устаткування та отриманого водню:

- поліпшення конструктивних схем і характеристик застосовуваних матеріалів та оптимізація термодинамічних параметрів процесу в традиційному режимі живлення постійним струмом (DC);
- застосування нетрадиційних режимів живлення електролізних комірок традиційних і спеціальних конструкцій електричним струмом (частотно-імпульсний – FP, розрядно-пульсуючий – DP, індукційно-імпульсний – IP, змінний – AC);
- використання зовнішніх енергетичних впливів і полів для інтенсифікації струмового процесу електролізу в традиційному та нетрадиційному режимі живлення.

На першому напрямку варто відзначити великий обсяг досліджень, які виконуються у США, країнах Європи, Японії та інших за певними програмами, що мають державну підтримку і забезпечення.

Зокрема, опрацьовуються шляхи інтенсифікації процесів електролізу за рахунок застосування тривимірних об'ємно-пористих проточних електродів з використанням тканих і нетканих вуглецево-волокнистих електродних матеріалів та пінометалів на основі нікелю, міді тощо, які мають високу питому активну поверхню і показують питому енерговитрати нижче $4 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{нм}^3 \text{ H}_2$ [34].

Значний прогрес щодо ефективності та здешевлення електролізерів досягнуто за рахунок удосконалення протонобмінних мембран (PEM) у вигляді перфорованої поліімідної підкладки, просоченої іономером PFSA (перфлуорсульфуркислоти), а також просторової оптимізації конструкції електролізного блоку з використанням для розділення водню й кисню у біполярній комірці газонепроникних провідних платівок (сепараторів) з титано-вуглецевого композиту, покритих шаром графіту [33]. Проте відомо і про розробку нового типу бездіафрагменного водневого реактора із системою магнітогідродинамічного відділення кисню від водню [34].

У той же час дослідники відзначають недостатність вивчення впливу на продуктивність і ефективність процесу електролізу геометричних форм і параметрів як самих електродів, так і електродних систем у цілому з огляду на топографію поля електричного струму, зокрема, наявності просторової неоднорідності розподілу його щільності в міжелектродних зазорах і навколо них, що призводить до витоків струму та погіршення характеристик електролізних апаратів. Тому в деяких роботах наводяться результати експериментальних досліджень, які показали для циліндричних електродів підвищення енергетичної ефективності електролізу й виходу водню на 25-30% у порівнянні з даними, отриманими для пластинчастих електродів [35].

Незважаючи на складнощі у створенні нових матеріалів і технологій, розробки, здійснені в провідних лабораторіях і корпораціях світу, демонструють вражаючі результати в підвищенні

ефективності електролізного устаткування та зниження капітальних витрат у виробництві електролітичного водню. Так, застосування розроблених протягом 2010-2012 рр. у Національному центрі NREL нових матеріалів і технологій привело до скорочення питомих капітальних витрат на одному електролізному блоці з більш ніж 1000 \$/кВт в 2007 р. до величини, меншої за 350 \$/кВт. При цьому вартість водню, виробленого зазначеним устаткуванням при ціні електрики 0,04 \$/кВт·год, оцінюється на рівні 3,15-3,64 \$/кг H_2 (0,28-0,32 \$/нм³ H_2) [36]. Такий результат засвідчує оптимістичну тенденцію для відновлювано-водневих технологій (ВВТ), але все ж до рівня конкурентоспроможності водню в якості палива для теплових двигунів в енергетиці є недостатнім.

Фактично навіть при досягненні гранично низького, теоретичного рівня питомих витрат електрики на отримання водню у традиційному режимі електролізу 39,4 кВт·год/кг H_2 (3,49 кВт·год/нм³) і за умови повної сплати вартості устаткування ціна водню визначиться вартістю використаної електроенергії. Якщо припустити її на рівні 0,04 \$/кВт·год, отримуємо ціну 0,14 \$/нм³ H_2 . Відповідно до об'ємних показників теплоти згоряння природного газу та водню витрата останнього на одиницю тепла майже втричі (2,8 рази) більша, тому ціну 1000 нм³ природного газу слід зіставляти з вартістю 2800 нм³ водню: для України наразі це співвідношення складе 420\$·1000 нм³ проти 140\$·2800 нм³, тобто 420 проти 392 \$ за 1000 куб. м.

Як бачимо, для України це вже рівень безбитковості, але експлуатаційні витрати, вартість зберігання і транспортування водню віддаляють ситуацію від ідеальної. До того ж ціна газу в різних країнах суттєво відрізняється (це Україні "пощастило" на захмарну ціну газу), отже навіть така вартість водню не забезпечить прорив ВВТ.

Тому у світі шукають можливості інтенсифікації процесу електролізу шляхом застосування нетрадиційних режимів живлення електричним струмом. Перш за все слід відзначити піонерську роботу *Shimizu* [37], в якій представлено новітній метод генерації водню електролізом води шляхом подачі ультракоротких імпульсів струму (УКІС) від індуктивного накопичувача енергії за допомогою особливого статичного тиристора. Зазначеним дослідженням встановлено, що УКІС поряд-

ку 300 нс здатні генерувати водень, причому на відміну від звичайного DC-електролізу потужність живлення можна збільшувати без зниження ефективності електролізу. Причину цього явища автори вбачають у принциповій відмінності механізму процесу.

Звичайний DC-електроліз води – це дифузійний процес, у якому щільність струму визначається коефіцієнтом дифузії іонів і зустрічає обмеження внаслідок виникнення подвійного електричного шару на поверхні електродів і дифузійного шару навколо них. Тому при незмінному об'ємі електрохімічної комірки важко збільшити вхідну потужність без зниження ККД електролізу, адже будуть зростати теплові втрати. При імпульсному живленні електроліз води відбувається за допомогою механізму, відмінного від звичайного DC. Коли ультракороткий імпульс напруги тривалістю менше декількох мікросекунд прикладається до електродів, зростання напруги відбувається настільки швидко, що не встигає сформуватися ні стабільний подвійний електричний шар на електродах, ні дифузійний шар навколо них. Тому підбором частоти і тривалості імпульсів вдається інтенсифікувати процес виділення водню.

Вказані результати знайшли підтвердження в інших роботах, у яких експериментально встановлено значне підвищення ефективності електролізного процесу при імпульсному живленні комірок. Зокрема, в [35] виявлено 34% зростання ефективності та продуктивності електролізу на специфічній частоті 60 кГц, а в [38] наводяться взагалі приголомшливі дані: в лабораторному електролізері продуктивністю 0,58 мл/с водню в наноімпульсному режимі досягнуто 96,8% зниження енергоспоживання відносно традиційного режиму DC (рис. 7).

Такий ефект автори вважають пов'язаним із дестабілізуючим впливом пульсуючого постійного струму на Н-О-зв'язки, що сприяє розщепленню молекул води.

Подібними до розглянутих, на нашу думку, є експерименти з пульсуючим монополярним розрядним струмом, які викладені в роботах [39, 40]. Тривалість імпульсу в досліді [39] була 0,29 мс (у 1000 разів більша, ніж у [37]), а частота пульсацій складала 200 Гц, в [40] – 100 Гц, тобто в 400-500 разів нижче. Стосовно енергетичної ефективності в указаних дослідіях обробка отриманих даних також показала дивовижні результати, схо-

жі з [38], які навіть важко інтерпретувати з позицій існуючих наукових уявлень. Автори припускають, що в умовах дослідів відбувалось чергування процесів заряду-розряду навколоелектродних електричних шарів, подібних до циклів системи конденсатор-акумулятор, на хвості розряду якої і здійснюється електронно-іонний обмін.

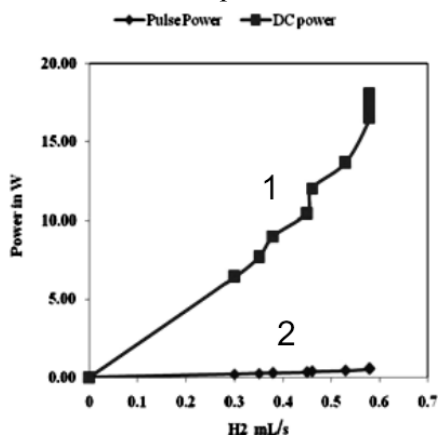


Рис. 7. Співставлення енерговитратності в режимі живлення: 1-DC і 2-FP.

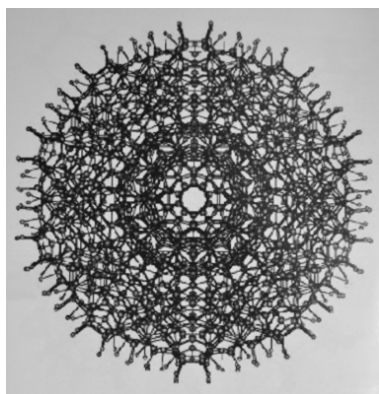


Рис. 8. Гігантський кластер води [43].

Правда, в роботі [40] був доданий ще один фактор впливу – постійне магнітне поле, спрямоване аксіально (уздовж електродів), яке у взаємодії з радіальним потоком іонів викликало, на думку авторів, закрутку (обертання) всієї маси електроліту, внаслідок чого з'являлась інерційна (відцентрова) складова силової дії на іони. Проте цей аспект заслуговує окремого розгляду.

Сукупність викладених фактів дозволяє уявити спільну основу в розглянутих способах інтенсифікації електролізу з механізмами явищ у наступній серії дослідів, де для живлення електролізера використовується вже змінний струм.

Перш за все вкажемо на так звані "резонансні" методи Мейєра [41] і Пухаріча [31], в яких для отримання водню застосована схема паралельного

коливального контуру, в котрому в ролі конденсатора виступає електролізна комірка. Тобто змінний струм вводиться безпосередньо в електроліт – гальванічним шляхом. Аналогічним є і спосіб Канзіуса [42]. Але в ньому, на відміну від попередніх, енергія в розчин подається індукційним шляхом – потоком поляризованого випромінювання радіочастотного діапазону. В цих установках електролітом слугує солоний розчин (NaCl) з концентрацією від 1 до 30%, (можливо й використання морської води), з нього за вказаною технологією видобувається водень у суміші з киснем (газ Брауна), придатний для безпосереднього спалювання, наприклад, у двигуні автомобіля. Але для завдань акумуляції в системах ВВТ вони непристосовані.

В той же час привертає увагу, по-перше, сам факт існування певної "резонансної" частоти, за якою змінний струм "залюбки" розщеплює молекули води! В дослідях Мейєра "резонансна" частота в залежності від концентрації електроліту та інших факторів знаходилась у діапазоні 10-250 кГц, у Пухаріча несуча частота 10-100 кГц модулювалась частотою 20-200 Гц, Канзіус застосовував випромінювання частотою 13,56 МГц! Але такі частоти насправді дуже далекі від власної резонансної частоти молекул води (10 ГГц). По-друге, вихід водню відносно спожитої енергії живлення на зазначених установках, як і розглянутих раніше, настільки перевищує фарадєєвські співвідношення, що автори змушені були шукати інші пояснення механізмів дії виявлених явищ.

Власне, автори вважали, що процеси в їхніх пристроях не можна розглядати як звичайний електроліз і пов'язували їх з енергетичними перетвореннями на рівні наноструктурних асоціатів молекул води типу тетрамерів, гексамерів і кластерів більшого порядку (рис. 8) [31, 43, 44].

З цього випливають далекосяжні висновки, а саме: руйнування багатомірних молекулярних асоціатів молекул води та вивільнення атомів водню й кисню із кластерів може здійснюватися зовнішніми енергетичними імпульсами електромагнітної та механічної природи широкого, але дискретного частотного спектра. Підтвердженням тому слугують, наприклад, ряд патентів, у яких для підвищення ефективності електролізу застосовані ультразвуковий та інфразвуковий генератори [45].

Таким чином, ми, фактично, виявили природне підґрунтя і третього напрямку інтенсифікації електролізних технологій. У світлі розглянутого матеріалу тепер можна впевнено зазначити в цій категорії нетрадиційних методів отримання водню запатентовані способи та пристрої, в яких одночасно з живленням електролізера у звичайному режимі DC застосовано:

- вплив змінного електричного або магнітного поля певної частоти, в тому числі резонансної, а також комбінацію цих полів одне з одним та з постійним магнітним полем;
- вплив (як уже згадано) інфра- та ультразвукових, а також віброакустичних полів (соноліз) у різних комбінаціях з електромагнітними полями;
- вплив штучного гравітаційного (інерційного) поля, створюваного зовнішнім приводом [46] або взаємодією накладених просторових складових електромагнітних полів.

Усі зазначені варіанти проходять випробування і без складової живлення DC, серед яких, на наш погляд, заслуговує на увагу пропозиція щодо здійснення електролізу безпосередньо в магнітній системі уніполярного генератора, якорем якого слугує маса електроліту, а приводом є вітрогенератор [47].

Висновки. Природно-кліматичні умови й існуюча промислова інфраструктура забезпечують Україні можливості для розгортання на своєму шельфі широкомасштабної мережі вітроенергетичних комплексів на плавучих платформах з використанням перспективної технології перетворення енергії за допомогою водневого циклу.

Досягнення конкурентних економічних показників використання виробленого на таких платформах електролітичного водню як промислової сировини та ефективного енергоносія вимагає системного рішення комплексу взаємозалежних технологічних завдань, найбільш істотні з яких розглянуті в даній статті. Зокрема, існують передумови для впровадження нових нетрадиційних методів електролізу води, стислий огляд яких наведено в статті. Проте, цим оглядом не вичерпуються нові напрямки отримання водню, але зрозуміло, що прогрес у цій сфері неминучий і близький.

1. Renewables 2013. Global status report / <http://www.unep.org/pdf/GSR2013.pdf>

2. *Huge renewable energy growth this decade, if EU countries meet projections* / <http://www.europeanenergyreview.eu/site/pagina.php?id=3390>.

3. The UK is the world's largest offshore wind energy nation. <http://www.statkraft.com/presscentre/news/the-uk-is-the-worlds-largest-offshore-wind-energy-nation.aspx>.

4. Оффшорные ветряные электростанции: обзор / <http://www.renewable.com.ua/wind-energy/40-offshornye-ventrjanye-elektrostantsii-obzor.html>.

5. Мхитарян Н.М., Кудря С.А., Яценко Л.В., Шинкаренко Л.Я. Состояние и перспективы использования водорода в возобновляемой энергетике // Альтернативная энергетика и экология. – ISJAEЕ. – 2012. – № 5–6. – С. 68–79.

6. Запорожец Ю.М., Кудря С.А. Ветро-солнечные энергетические комплексы с водородным циклом // Альтернативная энергетика и экология. – ISJAEЕ. – 2011. – № 8. – С. 66–75.

7. *Wind Power-to-Gas (P2G) technology*. – <http://energystoragejournal.com/wind-instrument-power-to-gas-technology/>

8. Carl-Jochen Winter. *Hydrogen energy – Abundant, efficient, clean: A debate over the energy-system-of-change* / International journal of hydrogen energy. – 2009, 34. – pp. S1–S52 // http://www.itshtytime.de/hytime/JHEvol34_14S1.pdf

9. Кузык Б.Н., Яковец Ю.В. Россия: стратегия перехода к водородной энергетике / М.: Институт экономических стратегий, 2007. – С. 402.

10. M. Vanags, J. Kleperis, G. Bajars. Water Electrolysis with Inductive Voltage Pulses // InTech: Chapter 2. http://cdn.intechopen.com/pdfs/40142/InTech-Water_electrolysis_with_inductive_voltage_pulses.pdf

11. Шеберстов О.М. Стан теплових електростанцій України, перспективи їх оновлення і модернізації // Енергетика і електрифікація. – 2004. – №12. – С. 1–6.

12. Мацевитый Ю.М., Стогний Б.С., Шидловский А.К. Научно-техническое обеспечение долгосрочных планов развития энергетики Украины // Енергетика та електрифікація. – 2013. – № 1. – С. 48–52.

13. Ковецкий В.М. Энергетическая эффективность технологий парогазотурбинных установок // Проблемы заальной энергетики. – 2008. – № 17. – С. 66–72.

14. Запорожец Ю.М., Кудря С.О., Резцов В.Ф., Романовський Г.Ф. Оцінка перспективи впровадження в енергетику України маневрених ПГУ з використанням нетрадиційного палива // Відновлювана енергетика. – 2013. – № 2. – С. 10–16.

15. Power-to-Gas solution. / <http://www.hydrogenics.com/docs/default-source/pdf/2-2-1-power-to-gas-4pg-brochure-2012.pdf?sfvrsn=2>

16. *Водород. Свойства, получение, хранение, транспортирование, применение*: Справ. изд. // Гамбург Д.Ю., Семенов В.П., Дубовкин Н.Ф., Смирнова Л.Н.; Под ред. Д.Ю. Гамбурга, Н.Ф. Дубовкина. – М.: Химия, 1989. – 672.

17. Яковлев А.И., Щекин А.Р. Водородсодержащий синтез-газ и синтетический метанол – перспективные топлива для энергетики / Альтернативная энергетика и экология. – 2013. – № 03 (121). – С. 27–40.

18. Paolo Chiesa, Giovanni Lozza, Luigi Mazzocchi. Using Hydrogen as Gas Turbine Fuel // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. – 2005. – Vol. 127. – P. 73–80.

19. R. Daniel Brdar, Robert M. Jones. GE IGCC Technology and Experience with Advanced Gas Turbines // GE Power Systems. – GER-4207 / [http://www.netl.doe.gov/technologies/coalpower/turbines/refshelf/igcc-h2-sygas/IGCC%20GTs%20\(GER4207\).pdf](http://www.netl.doe.gov/technologies/coalpower/turbines/refshelf/igcc-h2-sygas/IGCC%20GTs%20(GER4207).pdf)
20. Аминов Р.З., Байрамов А.Н., Шацкова О.В. Оценка эффективности водородных циклов на базе внепиковой электроэнергетики АЭС // Теплоэнергетика. – 2009, № 11. – С. 41–45.
21. Малышенко С.П. Исследования и разработки ОИВТ РАН в области технологий водородной энергетики // Альтернативная энергетика и экология. – 2011. – № 3(95). – С. 10–34.
22. Варинская Л.А., Андриенко А.Н. Современное состояние и оценка технико-экономических перспектив теплоэнергетической отрасли Украины // Электротехника та електроенергетика. – 2008. – №1. – С. 59–64.
23. Накоряков В.Е., Ноздренко Г.В., Кузьмин А.Г. Технико-экономические показатели ПГУ ТЭЦ с газификацией угля // Научный вестник НГТУ. Новосибирск, НГТУ. – 2009. – № 3. – С. 155–162.
24. Альтшуллер Г.С., Злотин Б.Л., Зусман А.В. Теория и практика решения изобретательских задач: сборник уч.-методич. материалов по ТРИЗ / Г.С. Альтшуллер – Кишинев: Картя молдовеняеске. – 1989. – 126 с.
25. Запорожец Ю.М., Кудря С.А. Ветросолнечные энергетические комплексы с водородным циклом // Альтернативная энергетика и экология – ISJAEЕ. – 2011. – № 8. – С. 66–75.
26. Запорожець Ю.М., Кудря С.О., Щокін А.Р. Створення вітросонячних енергетичних комплексів з водневим циклом на морських платформах – ефективний шлях використання відновлюваних ресурсів шельфу // Відновлювана енергетика. – 2011. – № 4. – С. 9–18.
27. Запорожец Ю.М., Кудря С.А., Блинцов В.С. Научно-технические задачи по созданию морских ветросолнечных энергетических комплексов с водородным циклом на украинском шельфе // Альтернативная энергетика и экология. – ISJAEЕ. – 2012. – № 5. – 240 с.
28. Запорожець Ю.М. «Морской водород» для экономики Украины // Альтернативная энергетика и экология – ISJAEЕ. – 2013. – № 3. – С. 13–26.
29. Frank Burmeister, Janina Senner, Jens Brauner, Rolf Albus. Potenziale der Einspeisung von Wasserstoff ins Erdgasnetz – eine saisonale Betrachtung // Energie | wasserpraxis 6/2012. – P. 52– 57. / <http://www.dvgw-innovation.de/fileadmin/dvgw/angebote/forschung/innovation/pdf/1206burmeister.pdf>
30. Energie der Sonne über das Erdgasnetz nutzen // Pressemitteilung, 12. Dezember 2012. / http://www.oeferngas.at/fileadmin/media/OOE_Ferngas_AG/Presse/2012/PA_Forschungsanlage_Wasserstoffeinspeisung_ins_Erdgasnetz.pdf
31. A.Puharich. Water Decomposition by AC Electrolysis. <http://www.rexresearch.com/puharich/1puhar.htm>
32. Peter Vang Hendriksen. Solid Oxide Electrolysis Hydrogen production // Fuel Cells and Solid State Chemistry Division, Risø DTU. – 2011.
33. Monjid Hamdan, Tim Norman. PEM Electrolyzer Incorporating an Advanced Low-Cost Membrane // I.I.D.1. – Contract Number: DE-FG36-08GO18065, FY 2012 Annual Progress Report. http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/progress12/ii_d_1_hamdan_2012.pdf
34. Ковалева О.В., Ковалев В.В. и др. Совершенствование электрохимических процессов водородной энергетики // Problemele energeticii regionale 1(15) 2011. – pp. 1 – 17.
35. Mandal B., Sirkar A. et al. Effects of Geometry of Electrodes and Pulsating DC Input on Water Splitting for Production of Hydrogen
36. Monjid Hamdan. PEM Electrolyzer Incorporating an Advanced Low-Cost Membrane // Project ID# PD030.– May16, 2012. http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/progress12/ii_d_1_hamdan_2012.pdf
37. Shimizu N., Hotta S. et al. A novel method of hydrogen generation by water electrolysis using an ultra-short-pulse power supply // Journal of Applied Electrochemistry. – 2006, 36. – P. 419–423.
38. Dharmaraj C.H., AdishKumar S. Economical hydrogen production by electrolysis using nano pulsed DC / International journal of energy and environment. – Volume 3, Issue 1, 2012. – pp.129-136.
39. Ф.М.Канарев. Низкоамперный электролиз воды / http://www.vixri.ru/d/Kanarev%20FM%20_nizkoampernyj%20elektroliz%20ovody.pdf
40. Бальбердин В.В., Жук Н.А. и др. Исследование процессов электролиза воды со щелочными электролитами для газогенерирующих устройств / http://www.ttr.com.ua/images/1_1.pdf
41. Stanley Meyer: Water Fuel Cell / <http://www.gpbbooks.com/freegas/MEYER.pdf>
42. R. Roy, M. L. Rao, J. Kanzius. Observations of polarised RF radiation catalysis of dissociation of H₂O–NaCl solutions // Materials Research Innovations. – 2008. – vol 12. – № 1. – P. 3–6.
43. Гончарук В.В. Наука о воде / В.В.Гончарук – Киев.: Наукова думка, 2010. – 512 с.
44. Гемши З., Бахманн П., Ивахнюк К.Г. и др. Физико-химические и биологические свойства электрофизически активированной воды / Альтернативная энергетика и экология. – 2013. – № 01/2 (118). – С. 162–168.
45. Сташевский И.И. Устройство Сташевского И.И. для расщепления воды на водород и кислород // Патент РФ № 2260077, 2004.
46. I.Bolvashenkov, Ch. Bertram, D. Buecherl et al. Promising Method for Hydrogen Producing and Its Potential Use on Board the Vehicle // International Journal Of Renewable Energy Research. – 2011. – Vol.1. – No.2. – P.71–75.
47. J.Bockris, H.Plantation. Future clean energy needs hydrogen and solar methods now that they are relatively cheap // Selected Articles of Hydrogen Phenomena. – Basim: Ekim. – 2009, ISBN: 978-605-5936-23-5. – P. 1–19.