

© П.Б. Саїк¹, Д.В. Янкін¹

¹ Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ОТРИМАННЯ ВОДНЮ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ В УКРАЇНІ

© P. Saik¹, D. Yankin¹

¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

ANALYSIS OF HYDROGEN PRODUCTION TECHNOLOGIES AND PROSPECTS OF THEIR DEVELOPMENT IN UKRAINE

Мета. Виконати аналіз вітчизняного та світового досвіду впровадження технологій водневої енергетики, оцінити можливість їх впровадження при розробці твердого викопного палива з обґрунтуванням етапів та кількісних показників отримання водню.

Методика досліджень. Для досягнення поставленої мети в роботі автори на підставі аналізу науково-дослідної літератури узагальнили існуючі технології водневої енергетики й обґрунтували методичний інструментарій для подальших досліджень.

Результати дослідження. З огляду вітчизняного та зарубіжного досвіду виробництва водню на базі викопних видів палива, зокрема вугілля, оцінена можливість подальшого розвитку паливно-енергетичного комплексу країни. Оцінена ефективність світового виробництва водню. Виділено основні напрями удосконалення технологій водневої енергетики: недоліки та переваги. Наведено та проаналізовано кількісні показники отримання водню при впровадженні технології газифікації вугілля. На основі проведеного аналізу зазначено, що вартість отриманого водню є найнижчою при технологіях газифікації вугілля (1,63 \$/кг) та біомаси (1,77 \$/кг), а найвищою при електролізі води при застосуванні нетрадиційних джерел енергії: сонячній – 5,78 \$/кг та вітровій – 5,89 \$/кг.

Наукова новизна полягає у систематизації та науковій обґрунтованості впровадження технологій отримання водню. Висвітлено основні закономірності, що дозволяють охарактеризувати ефективність впровадження водневих технологій. Зокрема увага приділена дослідженням виходу горючих газів (CO, H₂, CH₄) та баластному газу CO₂ залежно від температурного режиму.

Практичне значення. Оцінено вектори розвитку водневої енергетики. Отримано дані із застосування технологій отримання водню на базі твердих видів викопного палива, зокрема кам'яного вугілля, що в подальшому дозволяє визначити пріоритетні напрями їх впровадження. Описано технологічні процеси отримання водню залежно від вихідної сировини та методу його отримання. Запропоновано технологію підземної газифікації як перспективний напрям отримання водню.

Ключові слова: водень, воднева енергетика, природний газ, електроліз, біомаса, підземна газифікація, вугілля.

Вступ. Становлення українського паливно-енергетичного комплексу є вкрай важливим завданням для розвитку економічної безпеки країни. Це ставить перед виробничниками та науковцями цілу низку науково-практичних завдань, які вимагають нагального вирішення. Водночас стрімке зростання попиту на енергію та зменшення ресурсів викопних видів палива змушує суспільство постійно

шукати альтернативні методи виробництва енергії. Нестабільні ціни на нафту, а також посилення екологічного законодавства щодо викидів парникових газів змушують найбільші економічні держави шукати новий, конкурентоспроможний за ціною й екологічно чистий енергоносіє. Глобальна зміна клімату є важливою проблемою, яка, очевидно, впливає на навколишнє середовище. Викиди парникових газів є основною причиною утримання тепла в атмосфері, що призводить до кардинальної зміни клімату. Парникові гази в основному утворюються при згорянні викопного палива, наприклад нафти, природного газу і вугілля. Тому, на думку фахівців, у коротко- та середньостроковій перспективі водень, ймовірно, стане бажаним енергоносієм, при спалюванні якого утворюється вода та енергія [1, 2]. Нині водень здебільшого використовують в автомобільних системах [2]. Крім цього, водень може бути використаний як вихідна сировина для отримання хімічних сполук [3–5].

Воднева енергія – це чиста вторинна енергія з нульовим вмістом вуглецю. Вона виступає ключовим джерелом енергії, що поєднує транспорт, виробництво електроенергії та її зберігання. Тому вона має надзвичайно високий потенціал розвитку.

На сьогоднішній день Японія є країною, яка найбільше виробляє водню. Це зумовлено обмеженістю у ресурсах природного газу та нафти. Крім того, Японія та Китай активно зосереджуються на виробництві водню з використанням відновлюваних джерел енергії, зокрема сонячної та вітрової енергії [6, 7].

Значна кількість водню виробляється у США, Канаді та країнах ЄС. Хоча виробництво водню у світі зростає з кожним роком, але воно ще не є настільки розвиненим, щоб задовольнити попит на водень повністю. За даними Міжнародного агентства з енергетики у 2020 році світове виробництво водню становило близько 90 млн тон. Очікується, що ця цифра буде різко зростати, що є результатом нової техніки для відділення водню від газових сумішей: полімерних роздільних мембран. [8]. З цієї кількості близько 60 % використовують для виробництва аміаку та метанолу, а 27 % – для різноманітних промислових процесів, таких як виробництво металів та паливних елементів.

Європейський Союз визначив виробництво водню як один з основних елементів зниження викидів вуглецю до 2050 року, тому велика увага приділяється розвитку цієї галузі. 2020 року ЄС виробив понад 11 млн кг водню, причому майже 90 % його було вироблено методом парової конверсії природного газу [9].

Становлення технологій отримання водню. Існує декілька технологій отримання водню. Загалом методи та технології, виходячи із джерела енергії та сировини для отримання водню, наведено на рис. 1.

1. Парова конверсія природного газу, нафти та біогазу. Цей процес полягає у виробництві водню шляхом нагрівання природного газу з наступним відокремленням водню та вуглекислого газу. Парова конверсія є одним зі способів отримання водню з вуглеводнів (таких як природний газ, нафта, дизельне паливо тощо). Цей процес здійснюється в спеціальних установках, які називаються каталізаторами.

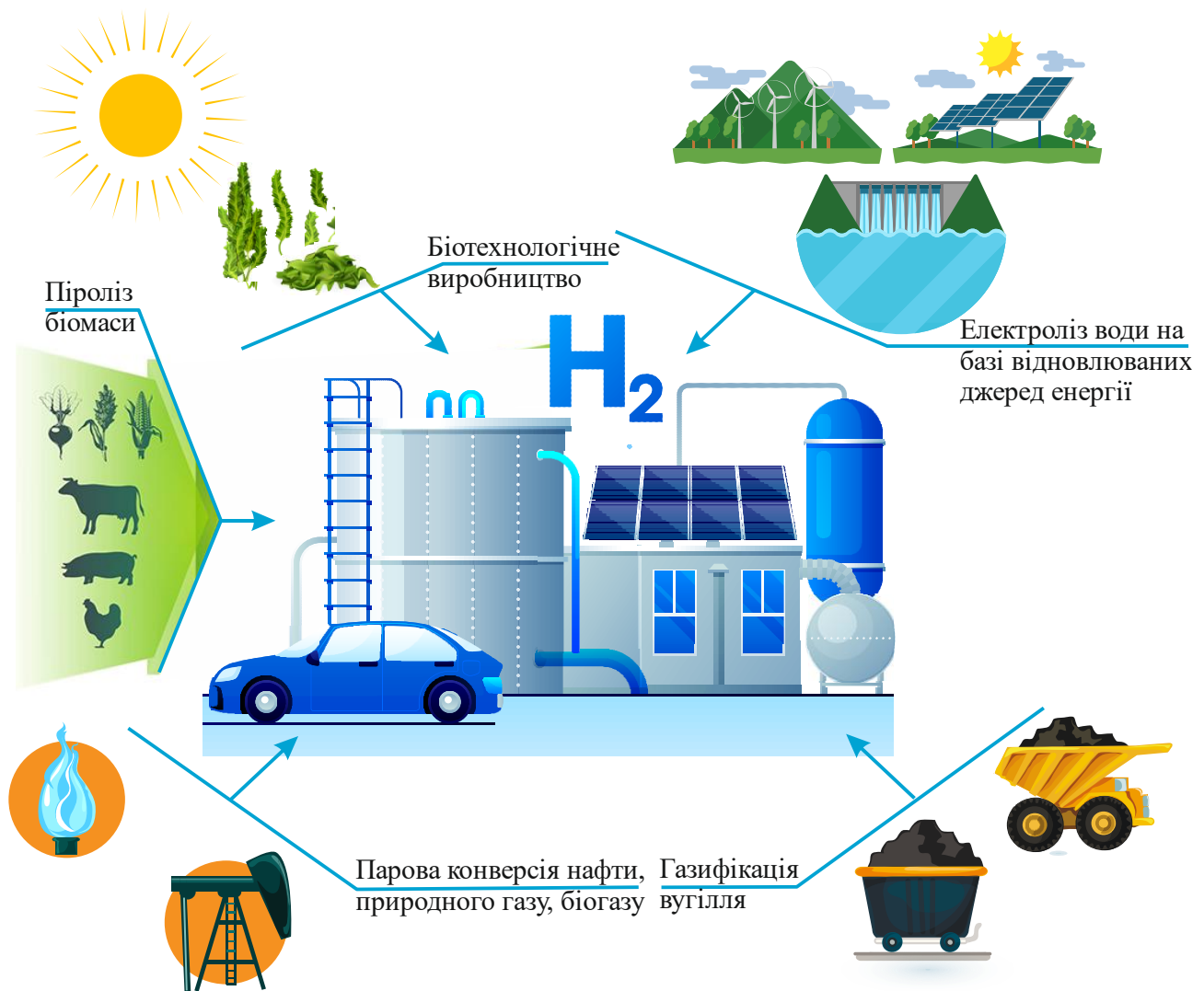


Рис. 1. Схема виробництва водню відповідно до вихідної сировини, технології та джерела енергії

Основна ідея парової конверсії полягає в тому, щоб вести реакцію відновлення вуглеводнів парою води за наявності каталізатора. При цьому водень, який міститься у вуглеводневій сировині, виділяється та реагує з молекулами пари води, утворюючи водень та вуглекислий газ. Реакція протікає за наявності каталізатора, який допомагає активувати молекули води та сприяє проведенню процесу.

Отриманий в результаті реакції газовий потік містить водень та вуглекислий газ, які можуть бути розділені за допомогою спеціальних технологій на окремі компоненти. Наприклад, вуглекислий газ може бути збережений або використаний для інших цілей, а водень може бути використаний як паливо у водневих технологіях або в інших хімічних процесах. Важливо зазначити, що парова конверсія вимагає великих температур і тиску, тому вона є енергоємною та вимагає значних капітальних витрат на обладнання. Однак цей метод є ефективним та економічно вигідним, оскільки він може бути використаний для виробництва водню з різних вуглеводневих джерел, які є достатньо доступними. Так, у роботі [10]

теоретично досліджено склад газу парової конверсії метану залежно від температурного режиму (рис. 2).

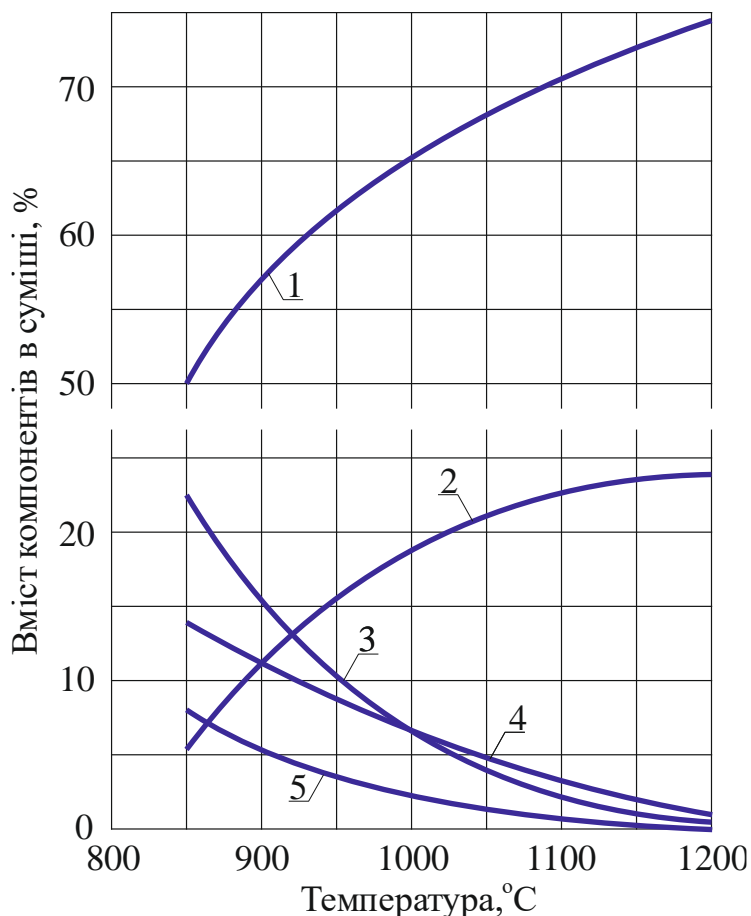


Рис. 2. Динаміка зміни концентрації водню при паровій конверсії метану в результаті реакції (3.1; 3.2; 3.3) (див. [10, ст. 70] від температури: 1 – водень; 2 – оксид вуглецю; 3 – метан; 4 – водяна пара; 5 – діоксид вуглецю

З аналізу наведених на рис. 2 залежностей видно, що зі збільшенням температури підвищується тільки концентрація водню та оксиду вуглецю у вихідній суміші. Також аналіз даних залежностей вказує на одну із переваг технології парової конверсії – зменшення концентрації діоксиду вуглецю.

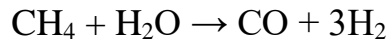
Технологічний процес парової конверсії природного газу може бути узагальнено такими етапами:

1. Підготовка сировини – природного газу. Цей етап включає очищення природного газу від домішок, таких як вода, сірка, тверді частинки та інші забруднювачі.

2. Підготовка реактора – конвертера. Конвертер є герметичним реактором з каталізатором в середині. Конвертер повинен бути підігрітий до високої температури (більше 800 градусів Цельсія) та підвищеного тиску (близько 30 бар).

3. Реакційний етап – конверсія природного газу воднем та вуглекислим газом. Природний газ проходить через реактор з каталізатором, де при високих

температурах та тисках відбувається реакція між метаном і водою, що призводить до утворення водню та вуглекислого газу:



Після реакційний етап – очищення водню та вуглекислого газу від забруднювачів та охолодження. Отриманий водень та вуглекислий газ проходять через систему очищення.

4. Розкладання водню та вуглекислого газу. Оскільки вуглекислий газ є шкідливим для більшості застосувань водню, його необхідно видаляти. Під час конверсії природного газу вихід водню може досягати близько 75 – 85% від кількості вуглеводнів, які використовуються, залежно від умов процесу та рівня чистоти отриманого газу.

2. Електроліз води на базі відновлюваних джерел енергії – це процес, який використовує електричний струм для розкладання води на молекули водню і кисню. Цей процес відбувається в електролітичній комірці, яка містить водний розчин або твердий електроліт. Як зазначено у документі «Проект Дорожньої карти для виробництва та використання водню в Україні» найбільш відомими і найбільш розвинутими варіантами є звичайні методи лужного електролізу і електроліз з протонобмінною мембраною [11]. Обидва методи працюють при низьких температурах 60 – 70°C. Електроліз лужної іонообмінної мембрани є третім низькотемпературним варіантом. Цей варіант є найменш розвиненим, оскільки технологія все ще проводиться в масштабах лабораторії.

Технологічна схема електролізу води містить такі етапи:

1. Підготовка води. Перед електролізом вода має бути очищена від домішок, оскільки наявність іонів домішок може негативно вплинути на процес отримання водню. Вода очищується фільтрацією та дистиляцією.

2. Підготовка електродів. Електроди, які використовують для електролізу води, зазвичай виготовляють з платини або інших матеріалів, які мають високу провідність та стійкість до хімічних реакцій.

3. Підготовка електроліту. Електролітом, який використовують для електролізу води, може бути розчин калійного або натрієвого лугу. Електроліт потрібен для забезпечення провідності струму між електродами та розкладання води на кисень та водень.

4. Збір та розкладання водню та кисню. Після проходження струму через воду на аноді утворюється кисень, а на катоді – водень. Гази збирають та розділяють за допомогою спеціальних пристроїв, які забезпечують розкладання газової суміші на окремі компоненти.

5. Зберігання та транспортування водню. Отриманий водень зберігають в стиснутому або охолоджену вигляді у спеціальних резервуарах або транспортних контейнерах.

Ефективність процесу виробництва водню, як зазначають автори роботи [12], можна оцінити ступенем розкладання води (рис. 3).

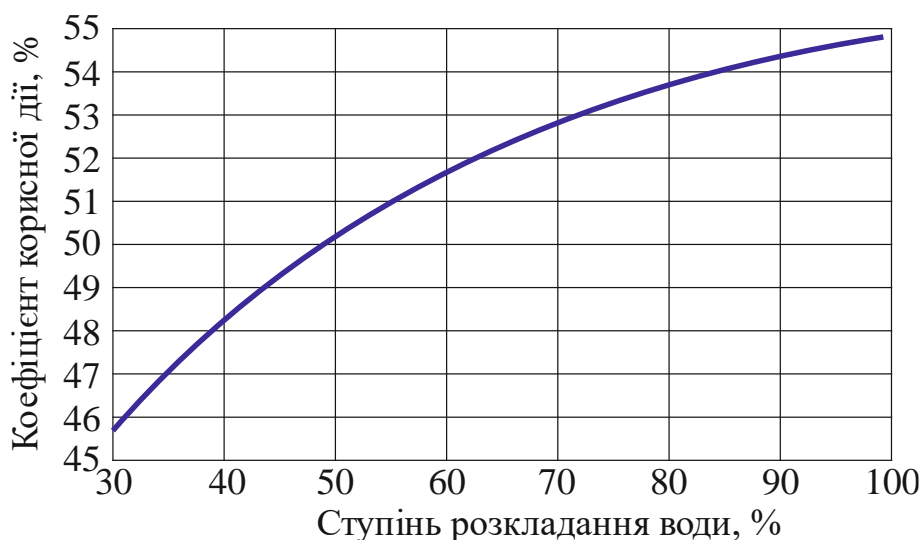


Рис. 3. Ефективність виробництва водню по відношенню до ступеню розкладання води

Аналіз наведених на рис. 3 даних показав, що ефективність виробництва водню може досягнути понад 53% по відношенню до ступеня розкладання води у 68 %.

Для зазначених вище умов енергії слугують сонячні електростанції та/або вітрогенератори. При застосуванні енергії сонця сонячні панелі перетворюють сонячне випромінювання на електричну енергію. Отримана електрична енергія потім використовується для подальшого розкладання води на водень і кисень у реакторі електролізу. Сонячне фотоелектричне виробництво водню має кілька переваг, включаючи використання безвідходного процесу, відсутність викидів в атмосферу та використання відновлюваних джерел енергії. Однак є кілька викликів, пов'язаних з цим методом виробництва водню, таких як високі витрати на виробництво та складність впровадження технології.

У цілому, сонячне фотоелектричне отримання водню є перспективним методом виробництва водню, особливо в регіонах з високим рівнем сонячної активності. Схема застосування вітрогенераторів аналогічна використанню енергії сонця, відмінність полягає у джерелі енергії – у нашому випадку це вітер.

3. Біотехнологічне виробництво водню – метод одержання водню за допомогою водоростей. Біологічне виробництво водню полягає у використанні фотосинтезуючих мікроорганізмів, таких як зелені водорості або бактерії, для виробництва водню з води та світла. Ці мікроорганізми здатні виробляти водень за рахунок зеленого світла, яке вони здатні захоплювати та використовувати для фотосинтезу. Серед фотосинтезуючих мікроорганізмів, здатних виділяти водень, найбільшу увагу привертають мікрководорості, гетероцістні ціанобактерії і пурпурні несірчані бактерії [13].

Існують також інші методи біологічного виробництва водню, такі як анаеробний розклад біомаси та використання мікроорганізмів, які виробляють водень у реакціях з вуглеводнем або сіркою. Біологічні методи виробництва водню

мають кілька переваг, включаючи використання біорізноманітності та відновлюваних джерел енергії, а також зменшення викидів парникових газів.

Так, у роботі [14] досліджено, що при піролізі водних рослин та водорості (елодеї і мікроцистіса) концентрація водню змінюється від 0,5 % до 2,1 %. Тенденція збільшення концентрації прослідковується при підвищенні температури. Встановлено також, що вміст азоту та кисню зі зростанням температури зменшується.

4. Піроліз біомаси. Процес піролізу біомаси може бути використаний для отримання водню, але цей процес є більш складним та менш ефективним, ніж інші способи виробництва водню, наприклад, електроліз води або природного газу. Проте піроліз біомаси може мати деякі переваги в порівнянні з іншими методами виробництва водню, зокрема тим, що він використовує відновлювані джерела та може бути більш екологічно стійким [15].

У процесі піролізу біомаси для отримання водню біомаса піддається розкладанню при високій температурі та без доступу повітря, що призводить до утворення газів, у тому числі й водню. Продукти піролізу потім проходять процес очищення та конденсації, щоб отримати водень.

Проте процес піролізу біомаси для отримання водню має свої обмеження. Один з головних недоліків полягає в тому, що він потребує великих кількостей біомаси, щоб отримати достатній об'єм водню, що може призвести до конкуренції з використанням біомаси для інших цілей, наприклад, для виробництва електроенергії шляхом спалювання або як джерело біорозкладаючих матеріалів. Крім того, процес піролізу біомаси для отримання водню є менш ефективним, ніж інші методи виробництва водню, що призводить до викидів вуглекислого газу та інших викидів.

Водночас у роботі [16] зазначено, що при піролізі 1 м³ деревини отримують у середньому 75 – 90 м³ газу, що має такий склад %: діоксид вуглецю – 47,7; оксид вуглецю – 16,9; метан – 9,7; ненасичені вуглеводні – 1,5; водень – 17,0; кисень – 0,4; азот – 6,8. А при газифікації компоненти деревини повністю руйнуються до рідких та газоподібних продуктів. Газова складова (синтетичний газ) включає окис (21 – 33 %) та двоокис вуглецю (5 – 11 %), водень (9 – 15 %), метан (1,5 – 3 %) та у незначних кількостях інші вуглеводні (0,5 – 0,9 %), кисень (0,2 – 0,5 %) та азот (46 – 54 %). Вихід газу становить 1,6 – 1,9 м³ на 1 кг сухої деревини.

Дослідження також показало, що вплив температури та часу утримання на виходи газів може бути складним та залежати від типу використовуваної біомаси. У деяких випадках було помічено, що збільшення температури може призводити до зменшення виходів газів, у той час як збільшення часу утримання може сприяти збільшенню виходів газів.

5. Отримання водню з викопного палива можливе за допомогою двох основних методів: парова конверсія та газифікація вугілля.

Парова конверсія полягає в проходженні пари через паливо (нафту, природний газ або вугілля), що при цьому спричинює розклад вуглеводнів на водень та вуглекислий газ. Цей процес відбувається за допомогою каталізатора при високій температурі та тиску. Водень та вуглекислий газ після розкладання можуть

бути використані для різних цілей, таких як виробництво електричної енергії або виробництво хімічних продуктів.

Газифікація вугілля полягає у введенні пари або кисню в реактор з вугіллям при високій температурі та тиску. При цьому вугілля розкладається на водень та вуглекислий газ. Такий процес може бути використаний для виробництва водню або синтез-газу, який може бути перетворений на різні продукти, такі як метанол, дизельне паливо та інші.

Варто зазначити, що виробництво водню з вичопного палива є менш екологічно чистим способом, оскільки при цьому утворюються значні об'єми вуглекислого газу та інших забруднюючих речовин. Однак цей метод є економічно вигідним та дозволяє виробляти великі об'єми водню (рис. 4) [17].

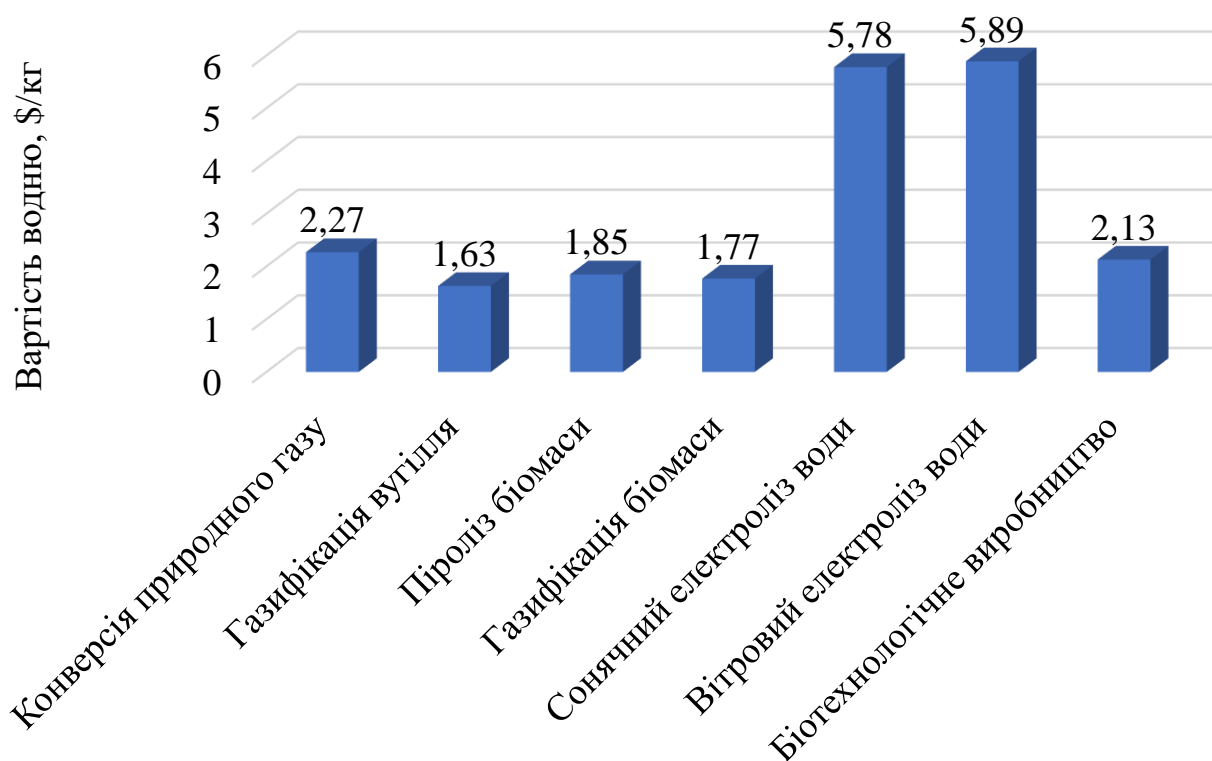


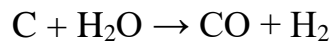
Рис. 4. Динаміка зміни вартості водню залежно від сировини

Перспективність отримання водню при підземній газифікації вугілля.

Отримання водню з вугілля має перспективу в контексті розвитку водневої енергетики, оскільки вугілля є широко поширеним та досить дешевим видом палива. Однак використання вугілля для отримання водню є вуглеінтенсивним процесом, що спричиняє значні викиди вуглекислого газу та інших шкідливих речовин.

Одним з можливих методів отримання водню з вугілля є процес газифікації вугілля, в результаті якого утворюється синтез-газ [18, 19]. Склад синтез-газу залежить від умов проведення процесу газифікації, але зазвичай він містить метан (CH_4), карбон оксиду (CO), водень (H_2) та інші гази.

Процес отримання водню при газифікації вугілля можна описати реакцією:



У цій реакції вугілля реагує з водяною парою, утворюючи карбон оксиду (CO) та водень (H₂). Ця реакція може бути ускладнена побічними реакціями, наприклад, утворенням метану (CH₄), але загальна формула може бути використана для опису процесу газифікації вугілля та отримання водню з нього.

Якщо мова йде про газифікацію вугілля з метою отримання водню, то зміна концентрації водню в процесі газифікації залежить від умов процесу та використаної технології. В загальному випадку можна сказати, що збільшення температури та зменшення часу зберігання газу після газифікації може збільшити концентрацію водню в газовій суміші.

Концентрація водню в газовій суміші при газифікації вугілля залежить від технології ведення процесу газифікації, температури та тиску у техногенно сформованій геореакторній системі, а також від складу дугтьових сумішей та вугілля [20, 21].

Отримання водню з вугілля має низку переваг:

- доступність сировини: вугілля є одним з найбільш поширених видів копалин у світі і його запаси достатні для виробництва великих об'ємів водню;
- незалежність від зовнішніх постачальників: виробництво водню з вугілля забезпечує незалежність від зовнішніх постачальників газу;
- низька вартість: виробництво водню з вугілля може бути дешевшим, ніж виробництво з інших джерел, особливо якщо вугілля добувають на місці його використання;
- низький вміст сірки: більшість вугілля має низький вміст сірки, що робить його більш прийнятним для виробництва водню, оскільки сірка може бути проблемою при використанні інших джерел енергії.

Однак отримання водню з вугілля також має свої недоліки, включаючи викиди в атмосферу великих об'ємів парникових газів та інших забруднюючих речовин, що потребують застосування додаткових технологічних та технічних рішень для зменшення їх впливу на довкілля. До недоліків відносять:

- високі викиди вуглекислого газу при газифікації вугілля можуть викидатися значні об'єми вуглекислого газу, що впливає на зміну клімату та загострює проблему глобального потепління;
- низький ККД: процес виробництва водню з вугілля не є дуже ефективним, оскільки його ККД не завжди досягає 50%;
- великі витрати енергії: виробництво водню з вугілля потребує значної кількості енергії, що вимагає великих витрат на його виробництво;
- утворення відходів: процес газифікації вугілля створює відходи, які можуть бути токсичними та важкооброблюваними;
- негативний вплив на навколишнє середовище: забруднення повітря та води, що відбувається під час виробництва водню з вугілля, може негативно впливати на здоров'я людей та навколишнє середовище;

– поступове вичерпання запасів вугілля слугує обмеженим фактором виробництва водню.

Висновки. Технології отримання водню мають велику практичну цінність у забезпеченні енергетичної безпеки та створенні більш стійкої та екологічно чистої енергетичної системи. Водень може бути використаний як паливо в енергетичних установках, таких як паливні елементи, а також як водневі джерела енергії в транспорті та промисловості. Крім того, водень може бути використаний як водневе паливо для забезпечення надійного та безперебійного енергопостачання в різних сферах, включаючи медицину, авіацію та космічну промисловість.

Проте необхідно враховувати економічні та соціальні фактори, що можуть вплинути на практичну цінність технологій отримання водню. Наприклад, вартість виробництва та транспортування водню може бути високою, що може зменшувати її конкурентоспроможність порівняно з іншими енергетичними джерелами. Також необхідно враховувати вплив виробництва водню на довкілля.

У будь-якому випадку розвиток технологій отримання водню продовжується, а залучення додаткових ресурсів та підтримка інноваційних рішень можуть сприяти подальшому збільшенню практичної цінності водню як енергетичного джерела.

Вдячність. Представлені результати отримано у рамках виконання науково-дослідної роботи ГП-512 «Когазифікація вуглецевмісної сировини при вигазуванні надтонких вугільних пластів з орієнтацією на отримання водню» (№ держреєстрації 0123U100985).

Перелік посилань

1. Rosen, M. A., & Koohi-Fayegh, S. (2016). The prospects for hydrogen as an energy carrier: an overview of hydrogen energy and hydrogen energy systems. *Energy, Ecology and Environment*, 1(1), 10-29.
<https://doi.org/10.1007/s40974-016-0005-z>
2. Makaryan, I. A., Sedov, I. V., Salgansky, E. A., Arutyunov, A. V., & Arutyunov, V. S. (2022). A Comprehensive Review on the Prospects of Using Hydrogen–Methane Blends: Challenges and Opportunities. *Energies*, 15(6), 2265.
<https://doi.org/10.3390/en15062265>
3. *Hydrogen-powered cars*. (n.d.). AccessScience.
<https://doi.org/10.1036/1097-8542.yb100255>
4. Crivello, J. C., Denys, R. V., Dornheim, M., Felderhoff, M., Grant, D. M., Huot, J., & Yartys, V. A. (2016). Mg-based compounds for hydrogen and energy storage. *Applied Physics A*, 122, 1-17.
<https://doi.org/10.1007/s00339-016-9601-1>
5. Hamilton, C. W., Baker, R. T., Staubitz, A., & Manners, I. (2009). B–N compounds for chemical hydrogen storage. *Chemical Society Reviews*, 38(1), 279-293.
<https://doi.org/10.1039/B800312M>
6. Chai, S., Zhang, G., Li, G., & Zhang, Y. (2021). Industrial hydrogen production technology and development status in China: a review. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 23(7), 1931-1946.
<https://doi.org/10.1007/s10098-021-02089-w>

7. Iida, S., & Sakata, K. (2019). Hydrogen technologies and developments in Japan. *Clean Energy*, 3(2), 105-113.
<https://doi.org/10.1093/ce/zkz003>
8. The race to develop green hydrogen – a sustainable challenge: (n.d.).
https://www.activesustainability.com/renewable-energy/production-green-hydrogen/?_adin=02021864894
9. Зануда, А. (2021). Зелений водень для України та світу: стратегічна перспектива чи новий великий пиик. BBC News Україна. <https://www.bbc.com/ukrainian/features-58722468>
10. Волошин, М.Д., Шестозуб, А.Б., Черненко, Я.М., & Зеленська Л.О. (2009). *Технологія неорганічних речовини. Частина 1. Технологія газів: навчальний посібник*. Дніпродзержинський державний технічний університет.
11. Zeng, K., & Zhang, D. (2010). Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, 36(3), 307-326.
<https://doi.org/10.1016/j.pecs.2009.11.002>
12. Fujiwara, S., Kasai, S., Yamauchi, H., Yamada, K., Makino, S., Matsunaga, K., Yoshino, M., Kameda, T., Ogawa, T., Momma, S., & Hoashi, E. (2008). Hydrogen production by high temperature electrolysis with nuclear reactor. *Progress in Nuclear Energy*, 50(2–6), 422–426.
<https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2007.11.025>
13. Подорванов, В.В. (2016). Фундаментальні біологічні проблеми водневої енергетики. *Науковий часопис НПУ імені М. П. Драгоманова*, 53, 25-255.
14. Криштопа, С., Криштопа, Л., Гнип, М., Микитій, І., Мельник, В., & Дикун, Т. (2019). Дослідження складу і теплоти згорання піролізних газів як палива для конвертованих на газ дизельних двигунів нафтогазового технологічного транспорту. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*, 2(13), 84-94.
<https://doi.org/10.36910/automash.v2i13.91>
15. Han, L., & Wang, Q. (2021). 6 Hydrogen production from biomass pyrolysis. *Hydrogen Production and Energy Transition*, 279-302.
<https://doi.org/10.1515/9783110596250-014>
16. Галиш, В.В., Ященко, О.В., & Трембус, І.В. (2022). *Комплексне перероблення рослинної сировини: Комплексна хімічна переробка деревини: навч. посіб.* КПІ ім. Ігоря Сікорського.
17. Tashcheiev, Y. V., Voitko, S. V., Trofymenko, O. O., Riepink, O. O., & Kudria, T. S. (2020). Global Trends in the Development of Hydrogen Technologies in Industry. *Business Inform*, 8(511), 103-114.
<https://doi.org/10.32983/2222-4459-2020-8-103-114>
18. Saik, P., Dychkovskiy, R., Lozynskiy, V., Falshtynskiy, V., Cabana, E.C., & Hrytsenko, L. (2021). Chemistry of the Gasification of Carbonaceous Raw Material. *Materials Science Forum*, (1045), 67-78.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.1045.67>
19. Lozynskiy, V., Dychkovskiy, R., Saik, P., & Falshtynskiy, V. (2018). Coal Seam Gasification in Faulting Zones (Heat and Mass Balance Study). *Solid State Phenomena*, (277), 66-79.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.277.66>
20. Saik, P., & Berdnyk, M. (2022). Mathematical model and methods for solving heat-transfer problem during underground coal gasification. *Mining of Mineral Deposits*, 16(2), 87-94.
<https://doi.org/10.33271/mining16.02.087>
21. Saik, P.B., Falshtynskiy, V.S., Lozynskiy, V.H., Cabana, E.C., Demydov, M.S., & Dychkovskiy, R.O. (2020). Efficiency of underground gas generator in consideration of the reverse mode. *Наукowyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (4), 39-46.
<https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-4/039>

ABSTRACT

Purpose. Systemize domestic and global experience in the implementation of hydrogen energy technologies and assess the possibility of their implementation in the development of solid fossil fuels with substantiation of the stages and quantitative indicators of hydrogen production.

Methods. To achieve the purpose of the work, the authors, based on the analysis of peer-reviewed research literature, summarized the existing technologies of hydrogen energy, and substantiated the methodological toolkit for further research.

Results. Based on the domestic and foreign experience of hydrogen production based on fossil fuels, in particular coal, the possibility of further development of the country's fuel and power complex was assessed. The efficiency of global hydrogen production is estimated. The main areas of hydrogen energy technologies improvement are highlighted: disadvantages and advantages. Quantitative indicators of hydrogen production at gasification technology are given and analyzed. It is noted that the cost of the obtained hydrogen is the lowest with coal gasification technologies (\$1.63/kg) and biomass (\$1.77/kg), and the highest with water electrolysis using non-traditional energy sources: solar – \$5.78/kg and wind – \$5.89/kg.

Originality. Consists in the systematization and scientific validity of hydrogen production technologies implementation. The main regularities that allow to characterize the efficiency of the hydrogen technologies implementation are highlighted. In particular, due attention is paid to the study of the combustible gases release (CO, H₂, CH₄) and ballast gas CO₂ depending on the temperature regime of the selected hydrogen production technology.

Practical implication. The vectors of the development of the leading energy industry are evaluated. Obtained data on the application of technologies for obtaining water based on solid types of fossil fuels, in particular hard coal. This allows for choosing the optimal direction of their implementation. Technological processes for obtaining hydrogen are described, depending on the raw material and the method of obtaining it. It is proposed to use underground gasification as a promising direction for hydrogen production.

Keywords: *hydrogen, hydrogen energy, natural gas, electrolysis, biomass, underground gasification, coal.*