

В. О. Колесніков

**ГІБРИДНІ ТА ЕЛЕКТРИЧНІ ТРАНСПОРТНІ ЗАСОБИ.
ПІДРОЗДІЛ: «ВОДНЕВИЙ ТРАНСПОРТ ТА ВОДНЕВІ
ТЕХНОЛОГІЇ»**

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ



**Полтава
ДЗ «ЛНУ імені Тараса Шевченка»
2023**

**Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Державний заклад
«Луганський національний університет
імені Тараса Шевченка»**

Кафедра технологій виробництва і професійної освіти

**ГІБРИДНІ ТА ЕЛЕКТРИЧНІ ТРАНСПОРТНІ ЗАСОБИ.
ПІДРОЗДІЛ: «ВОДНЕВИЙ ТРАНСПОРТ ТА ВОДНЕВІ
ТЕХНОЛОГІЇ»**

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського)
та другого (магістерського) рівня
денної та заочної форм навчання
спеціальності 015.38 «Професійна освіта»
освітньої-професійної програми «Транспорт»

**Полтава
ДЗ «ЛНУ імені Тараса Шевченка»
2023**

УДК 621(076)
ББК 34.4р 3
С42

Рецензенти:

Балицький О. І. – доктор технічних наук, професор, провідний науковий співробітник відділу міцності матеріалів і конструкцій у водневовмісних середовищах Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України.

Ревякіна О. О. – кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій виробництва і професійної освіти ДЗ «Луганський національний університет імені Тараса Шевченка».

Колесніков В. О.

Гібридні та електричні транспортні засоби. Підрозділ: «Водневий транспорт та водневі технології»: конспект лекцій з дисципліни «Гібридні та електричні транспортні засоби», для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) та другого (магістерського) рівня денної та заочної форм навчання спеціальності 015.38 «Професійна освіта» освітньої-професійної програми «Транспорт»/ В. О. Колесніков ; Держ. закл. «Луган. нац. ун-т імені Тараса Шевченка». Полтава : Вид-во ДЗ «ЛНУ імені Тараса Шевченка», 2023. 118 с.

Конспект лекцій з дисципліни «Гібридні та електричні транспортні засоби». «Водневий транспорт та водневі технології» підрозділ містить короткі теоретичні відомості; список рекомендованої літератури.

Конспект призначено для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) та другого (магістерського) рівня денної та заочної форм навчання спеціальності 015.38 «Професійна освіта» освітньої-професійної програми «Транспорт».

*Рекомендовано до друку навчально-методичною радою
Луганського національного університету імені Тараса Шевченка
(протокол №3 від 27.10.2023 року)*

© Колесніков В. О., 2023
© ДЗ «ЛНУ імені Тараса Шевченка», 2023

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
Тема 1. ПЕРЕДУМОВИ СТВОРЕННЯ ВОДНЕВОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ДЛЯ ТРАНСПОРТНОЇ ГАЛУЗІ	13
1.1. Класифікація автомобілів на водневому паливі	13
1.1.1. Паливний елемент	15
1.1.2. Паливний бак	20
1.1.3. Виробництво водневого пального	22
1.1.5. Деякі приклади іноваційних технологій отримання водню (ідеї для стартапів).....	39
1.1.6. Передумови для переходу на водневі джерела та технології з урахуванням потенціалу України	45
Тема 2. АВТОМОБІЛЬНИЙ ВОДНЕВИЙ ТРАНСПОРТ	49
2.1. Легкові водневі автомобілі	49
2.2. Вантажні водневі автомобілі	70
3. ІНШІ ВИДИ ВОДНЕВИХ ТРАНСПОРТНИХ	81
ЗАСОБІВ.....	81
4. ДЕЯКІ ПОДАЛЬШІ ПЛАНИ РОЗВИТКУ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ НОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ В ВОДНЕВИЙ	81
ЕНЕРГЕТИЦІ	81
ЛІТЕРАТУРА	86
ЛІТЕРАТУРА, ЩО ВИКОРИСТАНА ПРИ НАПИСАННІ КОНСПЕКТУ ЛЕКЦІЙ	86
ВСТУП.....	86
ТЕМА 1	87

ТЕМА 2.....	94
ЛІТЕРАТУРА ДО 3 ТА 4 РОЗДІЛІВ	98
ДОДАТКОВА ЛІТЕРАТУРА	99
ДОДАТОК А.....	113

ВСТУП

Популярність електромобілів останнім часом трохи здвинула на другий план автомобілі на паливних елементах. Проте при використанні водню необхідно враховувати не тільки його паливні властивості, але й і його вплив на властивості матеріалу, а саме на водневу стійкість.

Водень – це найпростіший і найпоширеніший хімічний елемент у Всесвіті, на частку якого припадає 74% всієї відомої нам матерії. Саме водень використовується зірками, в тому числі й Сонцем, для вивільнення величезної кількості енергії в результаті термоядерних реакцій [1].

Попри свою простоту і поширеність, на Землі водень у вільній формі майже не зустрічається. Шляхом своєї легкої ваги він або може підійматися в верхні шари атмосфери, або вступати у зв'язок з іншими хімічними елементами, наприклад з киснем, утворюючи воду.

Інтерес до водню, як до альтернативного джерела енергії, в останні десятиліття викликаний двома факторами. По-перше, забрудненням навколишнього середовища викопним паливом, що є основним джерелом енергії на даному етапі розвитку цивілізації. І, по-друге, тим фактом що запаси викопного палива обмежені та за оцінками експертів будуть виснажені приблизно через шістдесят років.

Водень, як, втім і деякі інші альтернативи, є рішенням перерахованих вище проблем. Використання водню призводить до нульових забруднень, оскільки в результаті виділення енергії побічними продуктами є лише тепло і вода, які можуть бути використані повторно для інших цілей. Запаси водню також дуже складно виснажити, враховуючи що він становить 74% речовини у Всесвіті, а на Землі входить до складу води, якою покрито дві третини поверхні планети.

Водень на побутовому рівні, вважають небезпечним хімічним елементом. Ця репутація закріпилася за ним після краху дирижабля Гінденбург в 1937. З усім тим Адміністрація з енергети-

чної інформації США (EIA) стверджує що в аспектах використання водню стосуються небажаних вибухів, цей елемент як мінімум так само безпечний як і бензин [2].

На поточний момент очевидно, що якщо не відбудеться чергової науково-технічної революції, то машини найближчого майбутнього будуть переважно або електричними, або водневими, або гібридними формами цих двох технологій і бензинових автомобілів.

У кожного з варіантів розвитку автомобільної індустрії є свої переваги й недоліки. Заправні станції під водневе паливо набагато простіше зробити на базі поточних бензинових заправок, чого не можна сказати про інфраструктуру для електричного «заряду» транспортних засобів.

У певному сенсі поділ на водневі та електричні автомобілі є штучним, оскільки в обох випадках машина використовує електрику для руху. Тільки в електрокарах електрика знаходиться в більш звичній для нас формі безпосередньо в акумуляторах, а в паливних елементах речовина, яку в результаті реакції буде переводити хімічну енергію в електричну, можна додати в будь-який момент.

Заправка воднем за часом порівнянна з заправкою бензином, і займає кілька хвилин, а ось повний заряд електричних акумуляторів на поточний момент в кращому випадку проводиться за 20-40 хвилин. З іншого боку електромобілі володіють тією перевагою що їх можна підключати до розетки безпосередньо вдома, і якщо робити це вночі, то можна ще економити на електротарифах.

Оскільки ні електрика, ні водень не є природними джерелами енергії, на відміну від викопного палива, то на їх отримання необхідно затратити енергію. Джерело цієї енергії стає вирішальним фактором в екологічності як водневих, так і в електричних автомобілях.

Для отримання водню потрібно або тепло, або електричний струм, які в спокотних і сонячних регіонах планети можуть бути отримані збором сонячної енергії. У холодних країнах, наприклад Скандинавії, вже зараз акцент робиться на більш відповідному для цього клімату джерелі зеленої енергії, на вітряних станціях,

які з таким же успіхом можуть брати участь у виробництві водню за допомогою електролізу. Примітне, що водень в такому випадку може використовуватися і для зберігання невикористаної енергії, наприклад, при виробленні вночі.

З огляду на обов'язкову стадію отримання водню й електрики, нульовий рівень викидів таких автомобілів залежить від того яким способом була отримана первинна енергія. Саме тому між обома типами транспортних засобів дотримується паритет і жоден не можна зарахувати до більш екологічного засобу пересування.

Автомобілі на паливних елементах, як і звичайні бензинові авто, відчувають певні проблеми на морозі. В середині самих батарей може міститися невелика кількість води, що замерзає при негативних температурах і приводить батареї в неробочий стан. Після прогріву батареї будуть працювати нормально, проте спочатку без зовнішнього обігріву, вони або не заводяться, або працюють деякий час на зниженій потужності.

Дистанція переміщення сучасних водневих авто становить приблизно 500 км, що помітно більше ніж у типових електрокарів, які нерідко можуть переміщатися лише на 150-200 км. Ситуація змінилася після появи Tesla Model S, однак навіть цей електрокар здатний переміщатися без «дозарядки» на відстань, поки що, не більше 430 км. Такі цифри досить несподівані якщо врахувати ККД відповідних типів двигунів. Для звичайних бензинових двигунів внутрішнього згоряння ККД становить приблизно 15%. ККД авто на паливних елементах – 50%. ККД електромобілів – 80%. На цей час концерн General Electrics працює над паливними елементами з 65% ефективністю і стверджує що їх ККД може бути підвищений до 95%, що дозволить запасати до 10 МВт електричної енергії (після перетворення) в одному елементі.

Однак слабким місцем електрокарів є самі батареї. Наприклад в Tesla Model S вона важить 550 кг, а повна вага авто становить 2100 кг, що на пару сотень кілограм більше ваги аналогічного водневого транспортного засобу. Вага цієї батареї до того ж не зменшується в міру подолання дистанції, в той час, як вироблене паливо в бензинових і водневих автомобілях поступово робить машину легше.

Виграють водневі елементи й в плані зберігання енергії в перерахунку на одиницю маси. У плані щільності енергії на одиницю об'єму водень не такий гарний. При звичайних умовах цей газ містить лише третину енергії метану в однаковому обсязі. Природно водень зберігається при транспортуванні й всередині паливних батарей в рідкому або стислому вигляді. Але навіть в цьому випадку кількість енергії (мегаджоуля) в одному літрі програє показникам бензину.

Сильні сторони водню виявляються при перерахунку енергії на одиницю ваги. У цьому випадку він вже в три рази перевершує бензин (143 МДж/кг проти 47 МДж/кг). Виграє водень за цим показником і в електричних батареях. При однаковій вазі водень має вдвічі більший запас енергії ніж електрична батарея.

Певні труднощі виникають і при зберіганні водню. Найбільш ефективна форма для транспортування і зберігання цього хімічного елемента це рідкий стан. Однак домогтися переходу газу в рідку форму можна лише при температурі в мінус 253 градуси Цельсія, що вимагає спеціальних контейнерів, устаткування і чималих фінансових витрат.

Не секрет, що головною перешкодою на шляху широкого застосування водню як палива зараз є висока вартість не тільки його видобутку, але і логістики. У зрідженому вигляді водень вимагає збереження температури мінус 253 градусів Цельсія. Японія сподівається, що до кінця десятиліття ринок водневого палива досягне стану, який дозволить йому конкурувати з викопними видами палива.

Влада країни, як зазначає Nikkei Asian Review, на наступний рік заклали в бюджет не менше \$ 800 млн на розвиток водневої екосистеми в якості екологічно чистого джерела електроенергії. Майже \$ 290 млн з цієї суми будуть витрачені на субсидування покупки транспорту на водневих паливних елементах і будівництво заправних станцій, яких зараз по всій країні налічується не більше 135 штук. Зараз в Японії зареєстровано 3757 машин на водневих паливних елементах, більшість з них належить державним структурам, адже навіть урядова субсидія на покупку такої машини зберігає її середню ціну на рівні \$: 68 000 [3].

Представлений нещодавно «воднемобіль» Toyota Mirai другого покоління коштує у два рази більше електромобіля Nissan Leaf, при цьому для подолання 850 км на першому потрібно витратити близько \$ 65, а повна зарядка електромобіля Nissan на суму \$ 18 дозволяє йому подолати 570 км. В цілому, як відзначають японські аналітики, щоб зробити водень економічно привабливою альтернативою зрідженому природному газу, потрібно зменшити вартість водню в п'ять разів, до 20 центів за кубометр. На їхню думку, цього можна домогтися до 2030 року, але при цьому потрібно значно збільшити обсяги споживання водню шляхом розвитку інфраструктури та застосування раціональних методів видобутку даного палива. Ринок повинен споживати по 10 млн тонн водню в рік, щоб він став таким же доступним, як викопні види палива [4].

Хоча водень і є найпоширенішим хімічним елементом у Всесвіті, людство поки не навчилося його добувати за прийнятною ціною. Японці розраховують на першому етапі отримувати водень з бурого вугілля австралійського походження, а потім транспортувати його на спеціальних танкерах по морю в Японію. На всю країну поки є один такий танкер, що забезпечує можливість зберігання зрідженого водню при температурі мінус 253 градусів за шкалою Цельсія. Деякі компанії пропонують змішувати газоподібний водень з толуолом - в цьому випадку для зберігання і транспортування такого палива можна використовувати інфраструктуру, що вже існує, знайому з вуглеводневих джерел енергії.

Альтернативою може стати використання аміаку в якості палива. Це з'єднання азоту і водню при спалюванні не формує вуглекислого газу. Його простіше перетворити в рідкий стан, ніж водень, а витрати на створення інфраструктури будуть набагато нижче.

І все ж, поки японська влада має намір фінансувати програму переходу на водневе паливо. До 2025 року кількість автомобілів на водневому паливі має збільшитися до 200 тисяч. У даного джерела електроенергії буде своя спеціалізація: водень можливо використовувати на важкому транспорті на зразок будівельної техніки, автобусів, поїздів, кораблів і літаків. Компактні

електромобілі цілком можуть задовольнятися тяговими батареями. Електростанції в майбутньому теж можуть бути переведені на генерацію електрики із запасів водню, якщо умови не дозволяють залучати для цього енергію Сонця або вітру [3 - 5].

Але отримання водню також може проходити як з забрудненням навколишнього середовища, так і без цього. У зв'язку з цим існує наступна класифікація отримання водню [6]: 1) Чорний або бурий (коричневий) (black or brown hydrogen) водень завдає найбільшої шкоди навколишньому середовищу, оскільки CO_2 та окис вуглецю, що утворюються у процесі виробництва, не рекуперуються. 2) Сірий водень (grey hydrogen) є найпоширенішою формою і виробляється з газу, або метану, з допомогою процесу, званого «паровий риформінг». Цей процес виробляє трохи менше викидів, ніж чорний або бурий водень, при виробництві якого використовується чорне (бітумінозне) або буре (лігніт) вугілля. 3) Блакитний водень (Blue hydrogen) маркується блакитним кольором, коли вуглець, що утворюється при паровому риформінгу, уловлюється та зберігається під землею за допомогою промислової системи уловлювання та зберігання вуглецю (СУЗВ) carbon capture and storage (CSS). Тому блакитний водень іноді називають вуглецево-нейтральним, оскільки викиди не розсіюються в атмосфері. Однак деякі дослідження [7] дозволяють стверджувати, що характеристика «низьковуглецевий» було б більш точним описом, оскільки 10-20% вуглецю, що утворюється, не може бути уловлено. 4) Зелений водень (green hydrogen) – також іноді називають «чистий водень» – виробляється шляхом використання чистої енергії з надлишкових відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна або вітрова енергія, для розщеплення води на два атоми водню та один атом кисню в процесі електролізу. Відновлювані джерела енергії не завжди можуть генерувати енергію в будь-який час, і виробництво «зеленого» водню може допомогти використати надлишок, що генерується під час пікових циклів. Зараз він становить близько 0,1% від загального обсягу виробництва водню [8], але очікується, що цей показник зростатиме в міру подальшого зниження вартості відновлюваних джерел енергії. Багато галузей також розглядають зелений водень як

найкращий спосіб гармонізації уривчастості відновлюваних джерел енергії – для зберігання надлишкової енергії в періоди низького попиту для подальшої подачі в мережу при підвищенні попиту – за одночасної декарбонізації хімічної, промислової та транспортної галузей [9].

У багатьох країнах світу та Європейського Союзу «зелений» водень розглядають як перспективне паливо для газових мереж і автомобільного транспорту [10]. Відбувається так тому, що водень допоможе скоротити викиди парникових газів. Відповідно, допомогти розв'язувати проблему зміни клімату.

Водневі національні стратегії та плани вже розроблені (або на стадії підготовки) в Австрії, Бельгії, Німеччині, Латвії, Франції, Румунії, Португалії, Польщі, Іспанії, Італії, Нідерландах та Швеції. В березні 2021 року в Україні представлено Проєкт Дорожньої карти для виробництва та використання водню [11].

Для успішного зберігання та транспортування водню необхідно вдосконалювати та розвивати транспорту інфраструктуру.

Вплив водню на різні властивості матеріалів може мати різний характер, що необхідно досліджувати.

Систематизацією та узагальненням вищезгаданих проблем займаються викладачі кафедри технологій виробництва та професійної освіти ЛНУ ім. Тараса Шевченка разом зі студентами спільно з науковцями відділу «Міцності матеріалів і конструкцій у водневовмісних середовищах», Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України.

Тема 1. ПЕРЕДУМОВИ СТВОРЕННЯ ВОДНЕВОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ДЛЯ ТРАНСПОРТНОЇ ГАЛУЗІ

1.1. Класифікація автомобілів на водневому паливі

Зараз у високо розвинутих країнах відбувається перехід до нових видів екологічних палива. Один з таких видів є застосування водню, але для подальшого переходу необхідно розвивати та впроваджувати нові технології в тому числі, та інфраструктуру [1, 2].

Бензинові та дизельні автомобілі зараз домінують на авторинку, а електромобілі та гібриди дуже повільно завойовують популярність. До останніх хочуть приєднати автомобіль на альтернативному паливі – водневих паливних елементах.

Водневий двигун (мотор) – різновид двигуна, де використовується для отримання енергії водень як пальне. Двигун складається з двох основних частин – це паливний елемент, як первинний генератор енергії та електродвигун, який її використовує для зміни її типу [3 - 6].

Автомобілі на водневому паливі умовно можна розділити на три класи [4].

Перший – це машини зі звичайним двигуном внутрішнього згоряння, який працює на водні або водневій суміші. Такі моделі можуть працювати на чистому водні або 5-10 % (відсотків) водню додають до основного палива. В обох випадках ККД (коефіцієнт корисної дії) двигуна збільшується (у другому випадку приблизно на 20 %) і вихлоп стає набагато чистішим (вміст чадного газу (CO) і вуглеводнів (CnHm) зменшується в півтора рази, оксидів нітрогену (NnOm) – до п'яти разів). Такі двигуни й автомобілі були сконструйовані й пройшли всі випробування у нас і за кордоном приблизно ще у 1970 – 1980-х роках. Однак, з огляду на витрати та складності конструкторського плану, цей тип може розглядатися тільки проміжним, перехідним етапом на шляху до третього типу.

Другий – це машини з двома електроносіями, так звані гібридні, їх колеса рухає електропривод, енергію якому постачає

аккумулятор, що своєю чергою заряджається від високоекономічного двигуна внутрішнього згоряння, що працює на водні або суміші водню з бензином. Це дуже вигідно, адже ККД електродвигуна сягає 90 – 95 % на відміну від бензинового (35 %) або дизельного (50 %). Таким чином, загальний ККД підвищується до 30 %, відповідно знижується витрата палива. Навіть якщо для підзарядки аккумулятора використовується бензин, об'єм шкідливих викидів дозволить вкластися в норми «Євро-4» із десятикратним запасом. Але другий тип не можна розглядати завжди як 100 відсотково водневим. Різновид такого автомобіля представив Mercedes-Benz.

Третій – справжній водневий автомобіль – це машина з електродвигуном, який працює від паливного елемента, що знаходиться в автомобілі. Теоретично ККД паливного елемента, що працює на суміші водень – повітря, може перевищувати 85 %. Зараз вже вдалося одержати двигуни з ККД близько 75 % – це більш ніж удвічі вище відповідного показника найкращих двигунів внутрішнього згоряння. В умовах міста такі машини одержать п'яти-шестиразову перевагу над звичайними автомобілями.

На рис. 1. наведено пристрій та влаштування автомобіля Toyota Mirai.



Рис. 1. Влаштування автомобіля Toyota Mirai [1].

Див. рис. 1. 1. Блок паливних елементів. Використано перші серійно вироблені концерном Toyota паливні елементи з високою питомою потужністю на одиницю об'єму (3,2 кВт / л) Максимальна потужність: 124 кВт. 2. Перетворювач, що підвищує та перетворює постійний струм, що виробляється паливним елементом, в змінний з підвищенням напруги до 650 В. 3. Нікель-метал-гідридний акумулятор запасає енергію, яка рекуперується при гальмуванні. При русанні з місця живить двигун спільно з паливним елементом. 4. Балони високого тиску. Робочий тиск всередині: 700 атм. Внутрішній об'єм: 60 л (передній балон) 62,4 л (задній балон). 5. Електричний мотор. Синхронний електродвигун змінного струму: максимальна потужність – 113 кВт (153,6 к.с.) максимальний крутний момент – 335 Нм. 6. Блок управління управляє паливним елементом, а також зарядкою / розрядкою акумуляторної батареї. 7 Додаткові пристосування. Помпа для підкачування водню та ін.

1.1.1. Паливний елемент

Паливний елемент, що працює на водні, – по суті і є водневим двигуном. Паливний елемент (інакше – електрохімічний генератор) – це пристрій для перетворення хімічної енергії на електричну. Те ж відбувається й у звичайних електричних акумуляторах, але в паливних елементах є дві важливі відмінності: по-перше, вони працюють доти, поки надходить паливо; по-друге, паливний елемент не потрібно перезаряджати.

Паливний елемент складається з двох електродів, розділених електролітом, і систем підведення палива на один електрод та окиснювача – на другий, а також системи для видалення продуктів реакції (рис. 2). У переважній більшості випадків з метою її прискорення використовують каталізатори. Зовнішнім електричним колом паливний елемент з'єднаний із навантаженням, що й споживає електроенергію [7].

У паливному елементі з кислим електролітом водень подається високопористим анодом і надходить в електроліт через мікропори у матеріалі електрода. При цьому відбувається розкла-

дання молекул водню на атоми, які в результаті хемосорбції, віддаючи кожен по одному електрону, перетворюються на позитивно заряджені іони. Цей процес спрощено можна описати такими рівняннями [7]:

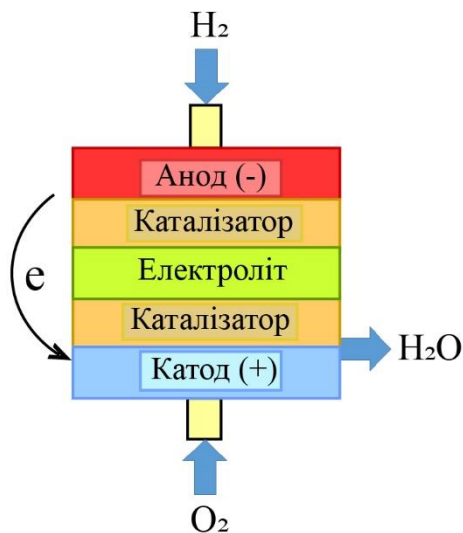
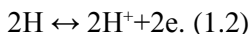
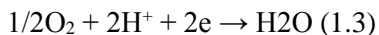
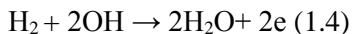


Рис. 2. Схема паливного елемента [7]

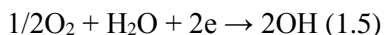
Іони водню 2H^+ дифундують через електроліт до позитивного боку елемента. Кисень, що надходить на катод, переходить в електроліт і також реагує на поверхні електрода за участю каталізатора. При взаємодії його з іонами водню та електронами, які надходять із зовнішнього ланцюга, утворюється вода:



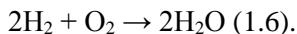
Подібні хімічні реакції відбуваються у паливних елементах із лужним електролітом (як правило, це концентровані гідроксиди натрію або калію). Водень проходить через пористий анод і реагує за наявності каталізатора з існуючими в електроліті іонами гідроксилу з утворенням води та електрона:



На катоді кисень вступає в реакцію з водою, що містить електроліт, й електронами із зовнішнього ланцюга. У послідовних стадіях реакцій утворюються іони гідроксилу. Результуючу реакцію на катоді можна записати у вигляді:



Підсумовуючи рівняння (1.1) – (1.3) та (1.4) – (1.5), одержимо давно відоме рівняння реакції окиснення водню:



Паливний елемент складається з багатьох десятків комірок, кожна приблизно в сантиметр завтовшки. Кожна комірка складається з двох електродів, розділених електролітом. На один електрод (анод) підводиться паливо (водень), на інший (катод) – окисник (кисень повітря). Водень тут не згоряє, хімічна реакція окиснення відбувається при низькій температурі в присутності каталізатора. Мета роботи пристрою, використовуючи цю реакцію, розділити позитивний і негативний заряди в просторі й створити між ними напругу. Тому електроліт, який заповнює простір між електродами, повинен мати здатність пропускати крізь себе протони (тобто іони водню) і не пропускати електрони. На аноді водень розпадається на електрони та протони, далі протони проходять крізь шар електроліту, досягають катода і, з'єднуючись із киснем, утворюють воду. Однак у питаннях отримання якісного й недорогого електроліту наука поки що зазнає величезних труднощів. Полімерний електроліт американської фірми «Дюпон» кош-

тує близько 700 євро за м², а на батарею для середнього автомобіля потрібно десятки квадратних метрів такого матеріалу. Зрозуміло, що при такій вартості електроліту неможливо налагодити серійний випуск водневих автомобілів. Ученими всього світу ведуться інтенсивні дослідження з метою здешевлення цього матеріалу й використання його при більш високих температурах (150 – 200°C).

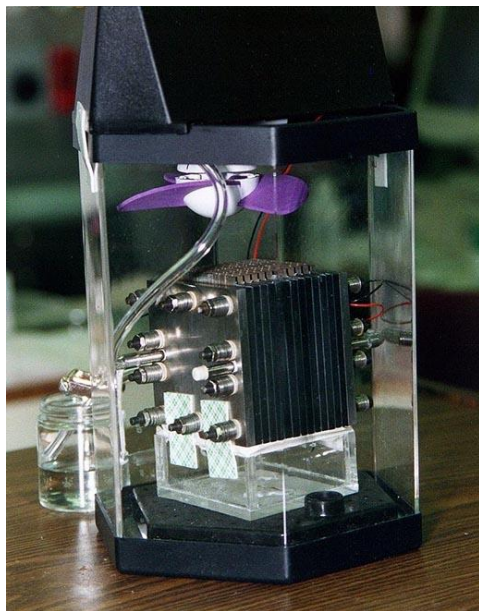


Рис. 3. Метаноловий паливний елемент.

Паливний елемент (англ. fuel cell) – електрохімічний генератор, який забезпечує пряме перетворення хімічної енергії на електричну. На відміну від традиційних електричних акумуляторів, де відбуваються аналогічні перетворення, паливні елементи мають дві важливі особливості: вони функціонують доти, доки паливо (відновник) та окиснювач надходять із зовнішнього джерела; хімічний склад електроліту в процесі роботи не змінюється, тобто паливний елемент не треба перезаряджати.

Назва «паливний елемент» аж до 1969 року вважалась умовною. Можливі різні варіанти комбінацій палива та окислювача. Так, водневий паливний елемент використовує водень як паливо та кисень (зазвичай з повітря) як окислювач. Також паливом можуть слугувати вуглеводні та спирти, а окислювачами повітря, хлор, оксид хлору.

Принцип дії паливних елементів заснований на хімічній реакції окислювача і палива, в результаті якої безпосереднім шляхом отримують електроенергію. Подібну реакцію можна спостерігати при згорянні палива у спеціальних печах, проте в паливних елементах окисно-відновна реакція не супроводжується виділенням диму та полум'я. Реагенти, якими часто використовують водень і кисень, із заданою швидкістю подають від спеціальних pomp до електродів, занурених в електроліт з розчину їдкої калію. Електроди, які зазвичай виготовляють з нікелю, в реакції не беруть участь, і тому вони не вимагають постійних заміन. На негативному електроді, до якого подають відновник водень, утворюються електрони. Навколо позитивного електрода, до якого підводять окисник кисень, виникають іони.

Паливні елементи на фосфорній кислоті широко використовуються в лікарнях, готелях, школах, на терміналах в аеропортах. Цей напрямок розробляє досить багато фірм. Проте, такі автомобілі дуже дорогі: вартість експериментального легкового автомобіля становить від \$200 тис. до \$1 мільйона.

Японська фірма Genepax розробила автомобіль з двигуном на водневому паливі, в бак якого заливається вода. 1 л води вистачає, щоб проїхати 80 км. Силова установка такого з паливних елементів мембранного типу, а вартість такого автомобіля поки \$1 мільйон. Але поширена також думка, що це шахрайство на кшталт вічного двигуна.

Під егідою НАТО готується науковий проєкт «Zero Emission SOFCs Operating on Methane Hydrates for Energy Security» з використанням паливних елементів, розроблених в Україні для отримання електроенергії з газогідратів Чорного моря. В ньому будуть брати участь наукові колективи зі США, Росії, України, Білорусі, Азербайджану.

Дослідження ефективності використання паливних елементів для бортового джерела електроенергії бойових машин проводяться Командуванням сухопутних військ США з розвитку бойових спроможностей (United States Army Combat Capabilities Development Command, CCDC) та іншими державами-членами НАТО.

Загалом, паливний елемент на водні цілком готовий до застосування. Бракує дрібниці: зробити його компактнішим і дешевшим.

1.1.2. Паливний бак

Проблема полягає в тому, що потрібен якийсь аналог паливного бака, але ж водень у паливний бак не наллеш. Це на сьогодні складає найбільші технічні труднощі. Учені розглядають досить багато варіантів. Наприклад, можна зберігати водень в акумуляторах на основі гідридів інтерметалічних сплавів, із яких за потребою поступово вивільняється чиста речовина. Але за цим варіантом маса водню в загальній кількості речовини (так зване аспектне число) становить всього 5 %, до того ж виникає проблема зі швидкістю вивільнення водню. Можна зберігати водень у рідкому вигляді. Але, по-перше, це вимагає охолодження до температур, близьких до абсолютного нуля (відповідно, зростає вартість водню), а по-друге, заправлений у такий спосіб автомобіль повинен буде витратити своє паливо якомога швидше. Дуже перспективний напрямок – зберігання водню в наноструктурах (вуглецевих нанотрубках), однак ці дослідження знаходяться поки що на початкових стадіях.

Найперспективнішим учені вважають збереження водню в балонах високого тиску – понад 350 атм. (аспектне число до 18 % при тиску вище 500 атм.) або отримання його прямо на борті з іншого палива (метанолу чи рідких вуглеводнів: бензину, дизельного палива та ін.), у спеціальних каталітичних реакторах (аспектне число близько 10 %). Такі системи розроблені вченими й за розумних габаритів забезпечують запас водню для пробігу в кі-

лька сотень кілометрів. Конструктори стикаються також і з іншими проблемами. Так, машина (насамперед кабіна) повинна мати систему водневої безпеки.



Рис. 4. Паливний бак для водню розроблений в корпорації Toyota (toyota-hydrogen-high-pressure-tank).

Для впровадження систем, що використовують водень необхідно вирішити три завдання, – як його виробляти, як його розподіляти і як його зберігати.

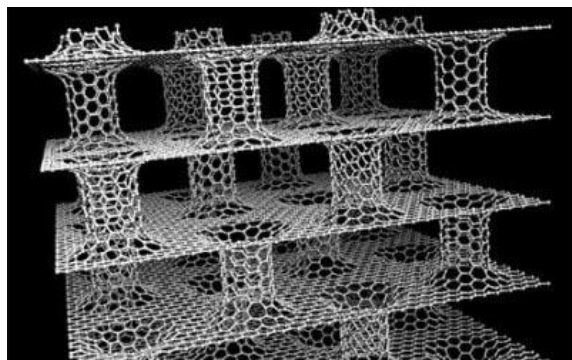


Рис. 5. Проект нового паливного бака для водню.

У Міністерстві Енергетики США вважають, що кращі металеві гідриди можуть вбирати близько 2 відсотків водню по вазі. Щоб ідея була економічно конкурентоздатною, сховище для водню повинне вбирати як мінімум 6% по вазі. Вчений Джордж Фраудакис (George Froudakis) і його команда з Критського Університету в Греції розробили новий матеріал, використовуючи дві популярні структури з вуглецю – графен і вуглецеві нанотрубки. Цей матеріал складається з шарів графену, що вистилають паралельно один одному і підтримуваних нанотрубками.

Ранні підрахунки команди говорять про те, що матеріал може утримувати до 6,1% своєї ваги у водні. Зараз учені співпрацювати з Дімітросом Гоурнісом (Dimitrios Gournis) з Університету Гронінгена в Нідерландах для справжнього виробництва матеріалу. Зараз вони створили листи з 40 шарів з фуллереном замість нанотрубок як опори. Вони говорять, що до кінця року вони зможуть замінити Фуллерен нанотрубками й створити теоретичний матеріал. Після успішного створення матеріалу учені протестують його на максимальну щільність розміщення вуглецю. Якщо новий тип баків для водню виявиться економічно ефективним для масового виробництва, то проблема пошуку наступного покоління паливних баків для пристроїв, що працюють на водні, може бути вирішена.

Для нашої країни також важливо, не залишитись позаду світових тенденцій. З огляду сучасних досліджень ми маємо потенціал до дотримання цього науково-технічного напрямку.

Згідно з джерелом [8] в Україні побудують установку з виробництва водню. Регіональна газова компанія (РГК) планує побудувати установку з виробництва водню на одному зі своїх експериментальних полігонів. У лютому 2020 року РГК приступила до тестового транспортування суміші водню і природного газу на закритих ділянках газорозподільної системи в п'яти областях країни.

1.1.3. Виробництво водневого пального

Сучасні технології виробництва водню далекі від досконалості. Але сьогодні вже одержують по 500 млрд м³ водню на рік.

Половина виробленої кількості йде на амонійні добрива, решта – на виробництво сталі, скла, маргарину та ін. В основному водень одержують за допомогою парового риформінгу природного газу: метан при високих температурах (900°C) у присутності нікелевого каталізатора реагує з паром. Поки що такий водень найдешевший [9].

Є й інші технології отримання водню, наприклад крекінг, електроліз або перероблювання біомаси (соломи, деревини). Кожен із цих варіантів має свої недоліки. Для перероблювання біомаси: її нагрівають на 500-600°C, після чого виходять спирти (метанол, етанол), які, перетворюючись на водень. Також можна нагріти біомасу до більш високих температур (1000°C), тоді вона повністю перетвориться на газ і вийде суміш H_2 і CO . Але для такого процесу знадобиться дуже багато сировини. За розрахунками [10], якщо усю родючу територію Франції пустити на вирощування біомаси, то водню, отриманого з неї, не вистачить навіть на те, щоб покрити потреби цієї країни в паливі навіть для нині наявних автомобілів.

Деякі способи отримання водню узагальнені в роботах [11-19].

Один з найпростіших способів отримання водню – електроліз (електричне розщеплення води). Результат – водень і кисень. Взагалі ефективність цього процесу не дуже висока: треба витратити 4 кВт електроенергії, щоб одержати 1 м³ водню, який, згоряючи, дасть лише 1,8 кВт енергії. Проте електроліз води досить перспективний. Також можна використовувати енергію атомної електростанції у години слабкого навантаження (коли вироблена там енергія виявляється непотрібною) або, зрештою, поновлювані джерела енергії (сонячні батареї, енергію вітру, припливу й ін.). Ця технологія активно розвивається: електроліз для більшої ефективності можна проводити за підвищеною температурою або тиском.

Зараз біологи активно розробляють ще один напрямок. Деякі водорості й бактерії в процесі фотосинтезу розкладають воду та виділяють водень. Проблема в тому, що вони роблять це тільки за відсутності кисню, отже, процес триває протягом дуже короткого часу, тому що при розкладанні води, природно, утворюється

і кисень. Завдання вчених – за допомогою генної інженерії продовжити цей період, тоді сонячні райони нашої планети були б забезпечені воднем.

Вчені Каліфорнійського університету в Берклі в 1999 році виявили, що якщо водоростям не вистачає сірки і кисню, то процеси фотосинтезу у них різко слабшають і починається бурхливе вироблення водню. Також водень може виробляти група зелених водоростей, наприклад, *Chlamydomonas reinhardtii*. Водорості можуть виробляти водень із морської води, або, каналізаційних стоків.

Водень успішно використовують як сировину вже багато років. Загальна оцінювальна вартість ринку сировини водню – 115 млрд \$ і, як очікується, вона буде тільки зростати, досягнувши до 2022 року 155 млрд \$. В наші дні водень широко застосовують у різних галузях і секторах (рис. 6).

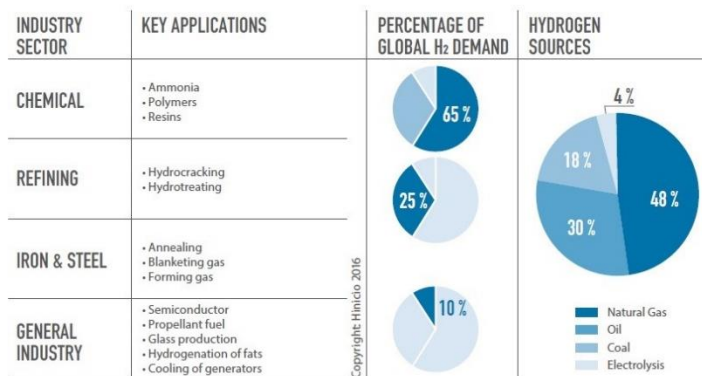


Рис. 6. Світовий попит і джерела виробництва водню. Джерело: IRENA, Hydrogen from renewable power. Technology outlook for the energy transition, Sep' 18 [9].

Термохімічний спосіб. Деякі теплові процеси використовують енергію з різних ресурсів, таких як природне вугілля, газ, або біомаса, щоб добути водень із їхньої молекулярної структури.

Низькі ціни на газ на Близькому Сході, а також в Північній Америці породжують одні з найнижчих витрат на виробництво водню. Імпортери газу, зокрема Корея, Японія, Китай, а також Індія, змушені боротися з вищими імпортними цінами на газ, що призводить до збільшення витрат на виробництво водню (рис. 7).

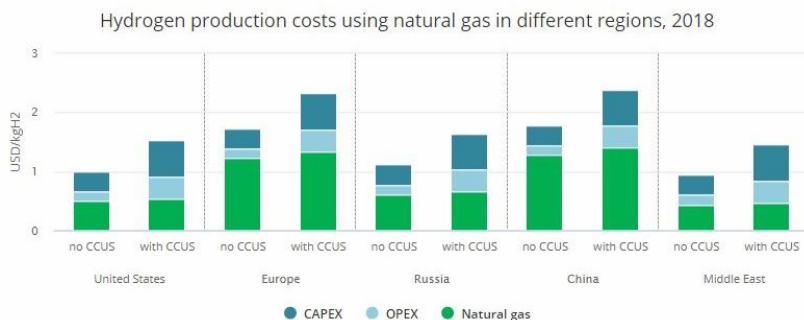


Рис. 7. Витрати на виробництво водню з використанням природного газу в різних регіонах. Джерело: The Future of Hydrogen Seizing today's opportunities, IEA, 2019 [9].

Серед наявних термохімічних процесів розрізняють:

Перетворення природного газу, або парова конверсія метану. Природний газ містить метан, який можна використовувати для виробництва водню. При паровій конверсії метан реагує з паром під тиском 3–25 bar у присутності каталізатора з утворенням водню, оксиду вуглецю і відносно невеликої кількості вуглекислого газу.

Газифікація вугілля – один із методів, за допомогою якого можна виробляти рідке паливо, хімікати, електроенергію, та водень. Так, водень отримують шляхом першої реакції вугілля з киснем та паром при високому тиску і температурах з утворенням суміші, що складається в основному з монооксиду водню та вуглецю.

Газифікація біомаси – процес, при якому органічні або вивчені вуглецеві матеріали перетворюються при високих температурах ($> 700\text{ }^{\circ}\text{C}$), без спалювання, з контрольованою кількістю пари й/або кисню в оксид вуглецю, вуглецю і водень діоксид.

Сонячний термохімічний водень. При термохімічному розщепленні води використовують високі температури (від концентрованої сонячної енергії або від непотрібного тепла ядерно-енергетичних реакцій) та хімічні реакції для виробництва кисню й водню.

Рідке перетворення на основі біомаси. Рідини, отримані з ресурсів біомаси, включаючи біомасло й етанол, можуть бути перетворені для виробництва водню в процесі, аналогічному перетворенню природного газу.

Електролітичний спосіб. Електролізери використовують електрику для розщеплення води на кисень та водень. Ця технологія добре розроблена і комерційно доступна. Різні електролізери працюють по-різному, в основному через різного типу матеріалу електроліту. Виділяють лужні, полімерні електролітичні мембранні, тверді оксидні електролізатори.

На рис. 8 наведено приклад установки з виробництва водню електролізним способом, яка володіє додатковою перевагою – можливістю отримувати газоподібний кисень (як цінний побічний продукт).

Виробництво водню методом електролізу – найпростіший і найдоступніший промисловий спосіб отримання водню з тих, що вже існує. При електролізі води в лужному розчині витрачається тільки вода (під впливом постійного електричного струму), лужний розчин додається для мінімізації електричного опору і для сприяння реакції, але не витрачається в процесі.

У всьому світі провідні дослідницькі інститути вивчають процеси штучного фотосинтезу, в яких сонячні промені беруть участь в хімічних реакціях, спрямованих на декомпозицію води для утворення водню. В Японії вчені створили унікальну гібридну технологію, яка дозволила одночасно отримувати водень шляхом розщеплення води і електрики за допомогою фотовольтаїки.



Рис. 8. Промисловий генератор водню [14].

Такі пристрої ще не досягли рівня реальних комерційних продуктів, оскільки для підтримки хімічної реакції часто потрібно додаткове джерело енергії. Але концепція постачання електролізера сонячною енергією для вироблення водню стрімко розвивається.

За словами розробників, інноваційна сонячна панель здатна поглинати 20,2% сонячного світла, при цьому її ефективність з вироблення водню склала 6,8%, а з електрики – 13,4% [25].

Процеси прямого сонячного розщеплення води.

Метод фотолізу використовують для розщеплення води на кисень й водень за допомогою сонячної енергії. Зараз метод знаходиться на ранній стадії дослідження і ділиться на:

фотобіологічний – для отримання водню використовують мікроорганізми й сонячне світло.

фотоелектрохімічний – водень виробляють з води з використанням сонячного світла і спеціалізованих напівпровідників, так званих фотоелектрохімічних матеріалів, які використовують світлову енергію для прямої дисоціації молекул води на водень і

кисень (це тривалий технологічний шлях із потенціалом зниження викидів парникових газів або їхньої відсутності);

Біологічні процеси. Бактерії та мікрободорості можуть виробляти водень за допомогою біологічних реакцій, використовуючи сонячне світло або органічні речовини. Розрізняють конверсію мікробної біомаси (здатність мікроорганізмів споживати та перетравлювати біомасу і виділяти водень) і фотобіологічний процес.

Фахівці прагнуть створити «водневі будинки», які зможуть не тільки знизити кількість що надходить в навколишнє середовище CO_2 , а й переробляти його в процесі штучного фотосинтезу. Для підтримки реакції використовується сонячна енергія, а кінцевим продуктом є водень (рис. 9 а, б).

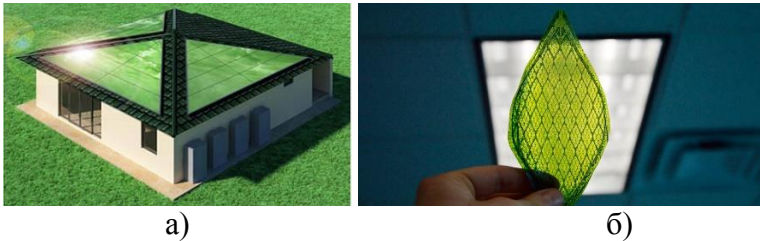


Рис. 9. Прототип «водневого» будинку, який використовує CO_2 для штучного фотосинтезу – а. Для підтримки процесу штучного фотосинтезу було створено спеціальний конверсійний пристрій на металооксидній підкладці – б [25].

Фахівці компанії Iida GHD спільно зі співробітниками університету створили дві нові технології. Перша – пристрій для вироблення і зберігання мурашиної кислоти, з якої згодом виділяється водень. Друга технологія полягає у використанні синтезованого водню для ефективного виробництва енергії [25].

Для підтримки процесу штучного фотосинтезу було створено спеціальний конверсійний пристрій на металооксидній підкладці, який споживає сонячну енергію і використовує віологен, каталізатор розщеплення воденьвмісних кислот (дегідратази) і спеціальні пігменти.

Інженери з Бельгії стверджують, що сонячні батареї можуть не тільки виробляти електрику, а й газоподібний водень, дозволяючи обігрівати будинки, при цьому не збільшуючи викиди вуглекислого газу.

Дослідники з Левенського католицького університету (KU Leuven) розробили панель, яка використовує для вироблення водню сонячну енергію, а також вологість повітря. Дослідна панель може виробляти 250 літрів газоподібного водню в день (рис. 9). Прототип забирає водяну пару та розщеплює її на молекули водню й кисню. Дослідники планують провести польові випробування свого дітища в одному з будинків у містечку Ауд-Хеверле. Протягом літніх місяців водень буде зберігатися під землею в невеличкій посудині під тиском, а потім перекачуватися по всьому будинку протягом зими. Якщо все піде за планом, команда встановить ще 20 панелей неподалік, щоб інші сім'ї також могли використовувати зелений (тобто екологічно чистий) водень.



Рис. 10. Сонячна панель розщеплює воду для виробництва водню [22].

Японські дослідники з Національного інституту матеріалознавства, Токійського університету й університету Хіросіми провели спільний техніко-економічний аналіз виробництва водню з

фотоелектричної енергії з використанням електролізера на батареях.

Результати цього дослідження дозволили припустити, що вартість водню становить від 17 до 27 ієн/м³ (від 0,16 до 0,25 \$). Спільна дослідницька група розробила інтегровану систему, здатну регулювати кількість розряду/заряду батареї та кількість вироблюваного електролізом водню залежно від кількості вироблюваної сонячної енергії. Потім команда оцінила економічну доцільність системи (рис. 11).

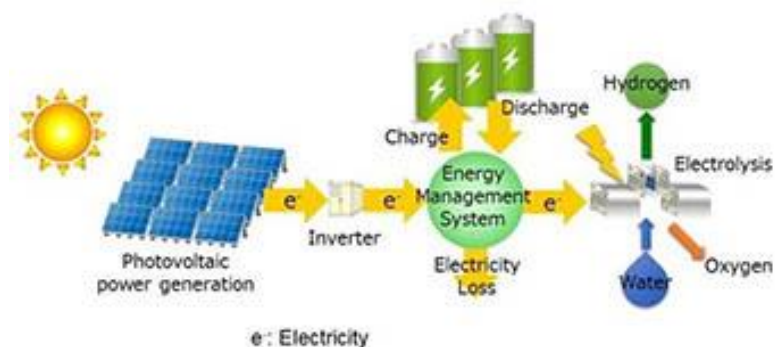


Рис. 11. Система здатна регулювати кількість заряду/розряду батареї та кількість вироблюваного електролізом водню залежно від кількості вироблюваної сонячної енергії.

Джерело: Japan team evaluates battery-assisted low-cost hydrogen production from solar energy, <https://www.greencarcongress.com>, Feb'19.

Очікується, що до 2030 року з'являться акумуляторні батареї, які будуть розряджатися з низькою швидкістю.

1.1.4. Розвиток «водневої економіки» на прикладі Японії

Після фукусімської аварії в березні 2011 року в Японії призупинили роботу більшості АЕС і приступили до розробки дорожньої карти щодо розвитку водню і паливних елементів. У червні 2014 року цю дорожню карту затвердив уряд [19].

Фаза 1. Розширення сфер використання паливних елементів (ПЕ) на базі водню 2017: масове ринкове тиражування ПЕ для комерційного і промислового використання.

~ 2020: зниження цін на водень до рівня, еквівалентного з цінами на інші види палива для гібридних автомобілів.

~ 2025: зниження цін на автомобілі на базі ПЕ до рівня цін гібридних автомобілів.

Фаза 2. Створення системи постачання водню

Середина 2020-х: стратегічні партнерства з закордонними постачальниками водню (планована ціна покупки - \$ 3 / кг) і створення комерційної системи розподілу водню.

~ 2030: початок експлуатації об'єктів з виробництва, транспортування, зберігання водню на базі імпортного палива. Масове впровадження технологій генерації електроенергії на базі водню.

Фаза 3. Створення безвуглецевої системи постачання водню.

~ 2040: повномасштабна експлуатація об'єктів з безвуглецевого виробництва, транспортування та зберігання водню.

Колишній автомобільний завод Toyota біля Мельбурна незабаром стане комерційним місцем виробництва та заправки воднем.

Австралійське агентство з відновлюваних джерел енергії (ARENA) внесе 3,1 млн дол. США, щоб допомогти в створенні Toyota Australia Hydrogen Center. Загальна вартість центру – 7,4 млн доларів. Центр буде використовувати сонячні фотоелектричні батареї та акумулятори для виробництва водню. Водень будуть виробляти за допомогою електролізу, а потім стискати його в паливні елементи. Toyota Australia Hydrogen Center буде також включати освітній центр та першу інфраструктуру для заправки воднем комерційних транспортних засобів [8].

Близько 97% норвезької електроенергії виробляється гідроелектростанціями, зараз є 15 кВт*год надлишкової потужності, тому необхідні нові способи використання цієї зеленої енергії. У вигляді водню її надлишки можна зберігати, розподіляти й робити доступними для ринків, що зростуть із нульовим рівнем викидів як в Норвегії, так і за кордоном.

У США провели дослідження: розробили спрощену модель для визначення та оптимізації теплових і економічних характеристик побутових фотоелектричних систем з електролізером, або з фіксованими панелями, або з панелями стеження за сонцем з використанням річного сумарного сонячного випромінювання на горизонтальній поверхні та кліматичних даних. Вибрали 12 місць із чотирьох кліматичних зон (сухої, тропічно-субтропічної, помірної, прохолодно-снігової). Моделювання було проведено для отримання даних про виробництво водню для різних місць, а отримані дані зіставлені для отримання виробництва водню в фотоелектричній системі в кг/кВт/год залежно від загального річного сонячного випромінювання на горизонтальній поверхні. Встановлено, що виробництво водню з фіксованими фотоелектричними панелями варіюється від 26 до 42 кг/кВт/год і має вартість від 25 до 268 \$/ГДж [8].

У США, Японії та скандинавських країнах від енергоустановок з водневими паливними елементами (потужністю понад 1 МВт) живлять великі бізнес-центри, госпіталі, житлові будівлі. В Японії діє ціла держпрограма створення побутових автономних водневих станцій – в країні їх уже кілька тисяч. Також японці працюють над програмою широкомасштабного використання водню, перш за все за допомогою модернізації енергетичного сектора та збільшення числа електростанцій, що працюють на водневому паливі.

25 вересня 2019 року Гесгенська гідроелектростанція (Alpiq Gösgen) сформувала епіцентр логістики з нульовим рівнем викидів на один день: Hydros spider AG і Hyundai Hydrogen Mobility (ННМ) представили бізнес-модель, засновану на зеленому водні, яка не має аналогів у Європі.

У Великобританії розроблений перший термодинамічно оборотний хімічний реактор, який виробляє водень у вигляді чистого потоку – без необхідності відокремлювати його від інших хімічних елементів (рис. 11).

Реактор, описаний в статті журналу Nature Chemistry, не змішує гази, що взаємодіють та переміщує кисень між потоками реагентів через твердотільний кисневий резервуар. Він спроектований таким чином, щоб підтримувати рівновагу з потоками, що вступають в реакцію газів і, відповідно, дозволяють зберігати «хімічну пам'ять» станів. В результаті водень виробляється як чистий потік, який не потребує дорогого виділення фінального продукту [23].



Рис. 12. Реактор для виробництва «зеленого» водню [23].

Дозволяючи воді й окису вуглецю вступати в реакцію для виробництва водню і двоокису вуглецю, система запобігає потраплянню вуглецю в потік водню. Цю ж технологію, можна застосувати не тільки до водню, але і до інших газів.

Планується, що до 2025 року 1600 швейцарських електромобілів Hyundai на паливних елементах будуть перевозити вантажі з зеленим воднем. Перша швейцарська установка з виробництва водню в промисловій експлуатації нині будується на Гесгенській ГЕС. З кінця 2019 року електролізна установка Hydros spider AG потужністю 2 МВт буде виробляти водень для

перших приблизно 50 електромобілів на паливних елементах, які будуть поставлені у Швейцарію у 2020 році.

Як видно з графіка нижче, з 1975 року попит на водень виріс більше ніж утричі, і продовжує зростати: майже повністю постачається з вичерпного палива, причому 6% світового природного газу і 2% світового вугілля йде на виробництво водню (рис. 13).

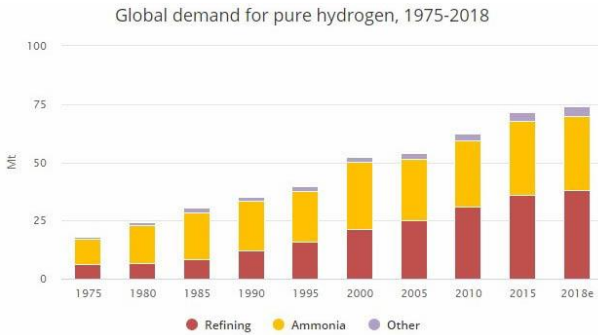


Рис. 13. Попит на водень. Джерело: The Future of Hydrogen Seizing today's opportunities, IEA, 2019 [9].

Зі зменшенням витрат на відновлювану електроенергію, зокрема від сонячної фотоелектричної енергії та вітру, інтерес до електролітичного водню зростає, і останніми роками було реалізовано кілька демонстраційних проєктів. Виробництво всієї виділеної сьогодні енергії водню з електроенергії призведе до споживання електроенергії в 3600 ТВт*год, що більше, ніж загальний річний обсяг виробництва електроенергії в Європейському союзі (рис. 14).

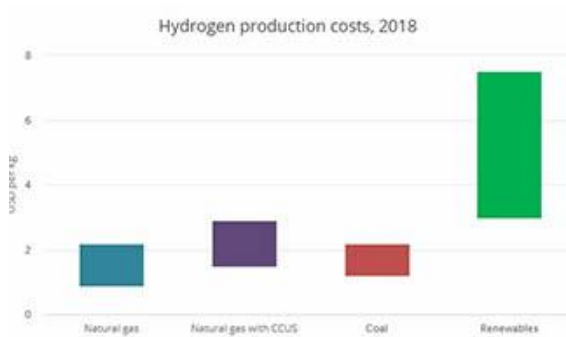


Рис. 14. Витрати на виробництво водню. Джерело: The Future of Hydrogen Seizing today's opportunities, IEA, 2019 [9].

Зі зменшенням витрат на вітрове виробництво і сонячне фотоелектричне, будівництво електролізерів у місцях із відмінними умовами використання ВДЕ може стати недорогим варіантом постачання водню, навіть після врахування витрат на передачу та розподіл транспорту водню з (часто віддалених) місць відновлюваних джерел енергії кінцевим користувачам (рис. 15).

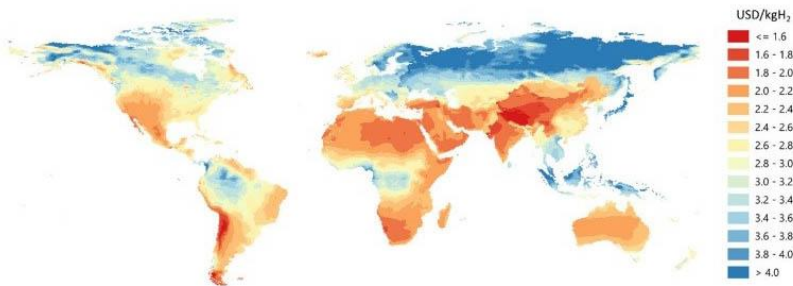


Рис. 15. Витрати на водень від гібридних сонячних фотоелектричних і наземних вітрових систем у довгостроковій перспективі. Джерело: The Future of Hydrogen Seizing today's opportunities, IEA, 2019 [9].

Водень вже широко використовують у деяких галузях промисловості, але він ще не реалізував свій потенціал для підтримки переходів у сфері чистої енергії. Для подальшого подолання бар'єрів і зниження витрат необхідні амбітні, цілеспрямовані та короткострокові дії.

Тривають пошуки нових способів одержання водневого палива, наприклад, з відходів. Так, наприклад, відомий патент [21], належить до способу обробки органічних матеріалів, що розкладаються анаеробно зі сміттєвих матеріалів або осадів стічних вод, і до пристрою для відділення діоксиду вуглецю від інших газоподібних речовин, отриманих при розкладанні органічного матеріалу. Спосіб включає формування реакційної суміші, що містить органічні матеріали, які анаеробно розкладаються, додаванням до неї електричного потенціалу і збір газу. Для отримання газу, що містить підвищену кількість водню і знижену кількість метану в порівнянні з газами, що утворюються мимовільно із зазначених органічних матеріалів, що анаеробно розкладаються, здійснюють переривчасту генерацію електричного струму з інтервалами, які визначаються відповідно до змісту водню і/або метану, в газі, отриманому з органічного матеріалу. Технічний ефект – підвищення продуктивності за воднем при зменшенні енерговитрат, скорочення часу, необхідного для перероблення органічних матеріалів.

Разом з тим поширення водневої енергетики поки обмежене відсутністю інфраструктури. Найстарішому водневому трубопроводу в районі міста Рур (Німеччина) всього 50 років, а найдовший подібний трубопровід має протяжність всього лише 400 км. При цьому в різних країнах є підмога – розвинена мережа газових трубопроводів, по яких можна передавати метано-водневу суміш, а потім, вже у споживача, розділяти цю суміш на водень і метан [19].

Водневі заправки вже працюють в Японії, США, Китаї та деяких країнах Євросоюзу. Розвитком водневої заправної інфраструктури займаються такі європейські компанії, як Air Liquide Air products, H2 Logic, Hydrogen Link, Danish Hydrogen Fuel, Linde, McPhy, Hydrogen Sweden, Icelandic New Energy.



Рис. 16. Приклад водневої заправки для автобусів в Китаї [18].

У звіті аналітичної і консалтингової компанії Navigant Research говориться про те, що до 2024 року кількість транспортних засобів з водневими паливними елементами по всьому світу зросте до 580 тис.. До 2026 року їх вже буде 800 тис., а до 2030 року - близько 1,5 млн. до речі, в цьому році за маршрутом Букстехуде – Куксхафен в землі Нижня Саксонія (Німеччина) почнуть курсувати два перших поїзда з водневим паливом Coradia iLint. Розробник, компанія Alstom, планує поставити тільки для цього району 14 таких поїздів до 2021 року [19].

Питання інфраструктури так само важливе, як і масштабне виробництво водню. Крім заправок і трубопроводів є питання в частині транспортування і скраплення. У світі зараз активно розробляються танкери, авто- і залізничні цистерни, призначені для доставлення водню. З'являються нові розподільчі системи, водневі балони високого тиску, автозаправки.

Сьогодні 95% виробленого водню споживачі використовують для власних потреб, а не для продажу. Наприклад, нафтопереробний завод виробляє водень, спалюючи нафтопродукти, і використовує його для отримання бензину. Всього у 2016 році у світі було вироблено 75 млн тонн водню, і лише 5% з них склав товарний водень, який продається на ринку як енергоносіє і хімічний реагент [19]. Однак в майбутньому цей показник напевно буде рости.

У консервативному сценарії зростання споживання промислового водню його частка до 2050 року збільшиться з 70 млн до 230 млн тонн на рік. Також буде рости частка товарного водню, з 4 млн до 140 млн тонн на рік. При цьому ринок товарного водню, одержуваного з використанням ВТГР, буде формуватися синхронно зі створенням потужностей цих реакторів. Якщо виходити з тези, що це зростання буде забезпечено екологічно чистим виробництвом на основі технологій ВТГР, то для виробництва 140 млн тонн водню в рік до 2050 року у світі повинні бути створені енергоблоки з ВТГР загальною тепловою потужністю 400 ГВт [19].

Компанія Toyota спільно з партнерами, в число яких увійшли фірми Toshiba й Iwatani, а також адміністрації декількох японських префектур, запустила випробувальний проєкт зі створення локальної енергосистеми, в якій енергоносієм виступає водень [26].

По суті система, що отримала назву «End-to-End Hydrogen Supply Chain», передбачає вироблення водню, його транспортування і безпосередньо використання на місцях певним транспортом. За задумом авторів, проєкт повинен наочно продемонструвати переваги водневого палива для економіки та екології, а також паралельно виявити можливі недоліки й складності в подібному енергетичному ланцюгу.

На першому етапі в ролі експериментальних транспортних засобів виступлять «вилочні» навантажувачі на водневих паливних елементах, побудовані відділенням Toyota Industries. Паливо для них буде вироблятися на території вітрової електростанції Йокогами за допомогою згенерованої нею енергією й електролізерів виробництва Toshiba. А доставлятися водень на місця буде за допомогою вантажних водневих заправокників.

У стратегічних планах Японії побудувати «водневе суспільство», в якому використання паливних елементів дозволило б жити не тільки автомобілі, але і дома, офіси та інші об'єкти.

Також деякі відомості про розвиток водневих технологій та інфраструктури можна дізнатись в наступних джерелах [27 - 33].

1.1.5. Деякі приклади іноваційних технологій отримання водню (ідеї для стартапів)

Ізраїльська компанія H₂Pro стверджує, що її високоєфективна технологія поділу води дозволить до 2030 року доставляти зелений водень за ціною менш як \$1 за кілограм [34].

Це буде означати зниження цін на «зелений» H₂ на 60-80% до рівня, при якому він буде дешевше на одиницю енергії, ніж поточні роздрібні ціни на бензин. Компанія представила лабораторний стенд, що виробляє крихітні кількості водню, але це є стрибок ефективності, а обіцяний ККД всієї системи в 95%.

Електроліз з генерацією струму виробляє водень і кисень одночасно, пропускаючи електрику через воду, збагачену лугом або кислотою, для утворення газоподібного кисню, який притягається до анода, а водень притягається до катода. Ця операція виконується в камері, яка фізично розділена мембраною, що дозволяє збирати кожен газ окремо (рис. 17).

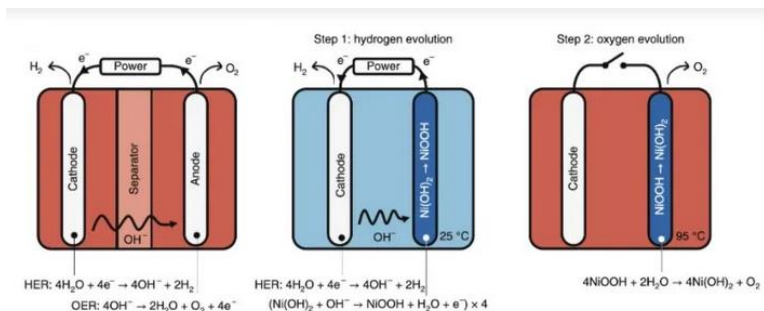


Рис. 17. Типова конструкція односхідчастого електролізера з мембраною, що розділяє гази водню і кисню (а) двоетапний процес Е-ТАС. Перша, холодна, електрохімічна стадія генерує водень і окислює анод. Другий, термічно активований етап регенерує анод, виділяючи кисень, і не вимагає струму (б) [34].

Е-ТАС, що означає «електрохімічне – термічно активоване хімічне розщеплення води», був спочатку розроблений в Ізраїльському технологічному інституті. В ході цього процесу виробляються водень і кисень у двох окремих процесах. На першому

(електрохімічному) етапі через воду пропускають струм при 25°C, виділяючи H₂, який може збиратися біля катода, та іони гідроксиду (OH⁻), які притягуються до анода з гідроксиду нікелю (Ni(OH)₂). Це окислює анод до оксигідроксиду нікелю (NiOOH).

Другий етап відключає електричний ланцюг і нагріває воду до 95°C, оптимальної точки, в якій анод з оксигідроксиду нікелю реагує з водою. Цей процес вивільняє кисень, який він отримав на першому етапі, повертаючи анод назад, в гідроксид нікелю і налаштовує його на інший цикл. Додатки до води, в тому числі кобальту, допомагають запобігти утворенню небажаного кисню на першому етапі.

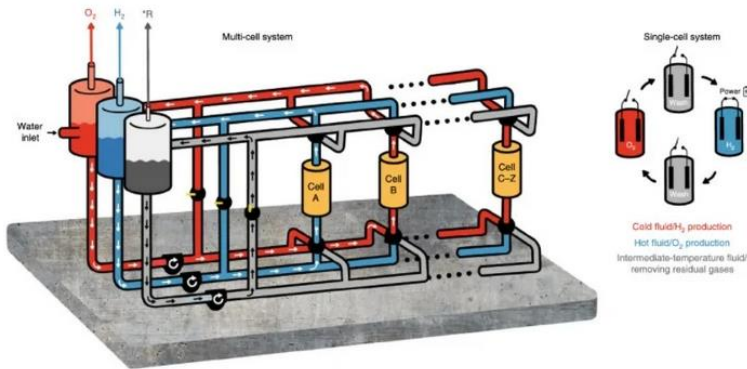


Рис. 18. Реалізація Е-ТАС з декількома осередками (а). Праворуч: одноклітинний розчин (а). Сірі канали є промивною рідиною з проміжною температурою, яка використовується для промивання між ступенями (б) [34].

Газоподібні водень й кисень ніколи не змішуються, тому мембрана між ними взагалі не потрібна. Таким чином, ризик вибухонебезпечного змішання газів виключений. Система Е-ТАС, на відміну від мембранних систем, може підтримувати виробництво під високим тиском – до 100 бар, що означає, що вам не потрібно витратити більше грошей на компресори. Також відсутність мембрани допомагає скоротити капітальні витрати, експлуатацію та технічне обслуговування.

Як приклад, в Фізико-механічному інституті ім. Г.В. Карпенка НАН України відбуваються дослідження за проектом «Розроблення воденьакумулюючих і воденьгенеруючих матеріалів на основі гідриду магнію та оптимізація роботи систем постачання водню для паливних комірок» [7, 35, 36].

Композити на основі магнію та/або його гідриду є перспективними матеріалами для акумулювання та генерування водню у пристроях постачання водню в автономних системах енергозабезпечення на основі портативних паливних комірок. Пристрої для зберігання та транспортування енергії з відновлювальних джерел базуються на роботі джерела водню в парі з паливною коміркою. При цьому в джерелах постачання водню можливе використання гідридних композитів на основі магнію в акумуляторах водню та використання цих же композитів з каталітичними добавками в пристроях гідролізного одержання водню.

Основним завданням роботи є синтез дослідних зразків нанокompозитів типу Mg-ІМС з різним вмістом ІМС як каталітичного додатку. Для зменшення агломерації частинок MgH_2 в процесах сорбції-десорбції буде використано інертні добавки (вуглець різних модифікацій), виготовлено складні композити Mg-ІМС-С на основі української сировини та апробовано ці матеріали в роботі акумулятора водню (див. рис. 19, 20).

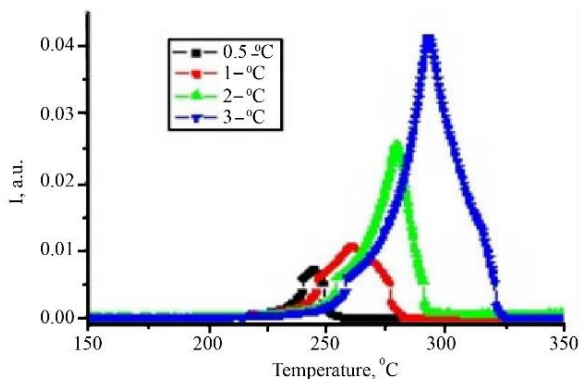


Рис.19. ТДС для гідридного композиту Mg-10 мас.% нано-TiN за різної швидкості нагрівання [35].

Буде синтезовано нові матеріали (гідриди магнію з каталітичними додатками) для генерування водню шляхом гідролітичних реакцій (див. рис. 15, 16). Буде досліджено вплив наноструктурування на ефективність реакції гідролізу та виготовлено пілотний генератор водню на основі гідриду магнію для живлення паливних комірок. Буде відпрацьовано режими роботи генератора водню. Значну увагу в роботі буде приділено дослідженню характеристик сорбції-десорбції водню з газової фази. Композиційні матеріали з ємністю > 5 ваг.% водню володітимуть покращеними параметрами сорбції-десорбції та будуть досліджуватимуться з метою встановлення їх циклічної стійкості.



Рис. 20. Обладнання для механохімічного синтезу гідридних композитів та дослідження їх воденьсорбційних властивостей [35, 36].

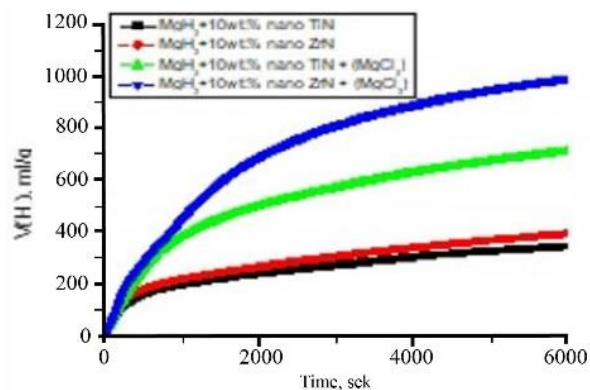


Рис. 21. Виділення водню в процесі гідролізу [35, 36].



Рис. 22. Дослідна установка для дослідження процесів генерування водню шляхом гідролізу (ФМІ НАН України) [35, 36].

Очікувані властивості нових гідридних композитів

Буде синтезовано нові матеріали (гідрид магнію + каталітичний додаток) для пристроїв генерування водню шляхом гідролізу та апробовано їх в портативних системах енергозабезпечення генератор водню-паливна комірка. Буде апробовано ряд нових каталітичних додатків з метою визначення найкращих

складів як водень акумулюючих так і водень генеруючих матеріалів. Буде перевірено вплив наноструктурування на одержання водню з гідридних композитів магнію шляхом реакції гідролізу.

Переваги

У запропонованому способі перевагою є можливість отримання та зберігання великих кількостей водню при використанні недорогих надлишків електроенергії з поновлюваних джерел. Та пропонується спосіб ефективного, мобільного, екологічно чистого виробництва енергії з використанням реакції гідролізу.

Стан розробки

Вдосконалене обладнання для механохімічного синтезу та створене обладнання для дослідження гідролізних реакцій. Синтезовано нові матеріали (гідрид магнію-каталітичний додаток) для пристроїв генерування водню шляхом гідролізу та буде апробовано їх в портативних системах енергозабезпечення генератор водню-паливна комірка.

Серед останніх новин в цій сфері можна виділити будівництво першого заводу з виробництва зеленого водню на сонячних батареях, який розташований в Остервольді, в голландській провінції Фрісландія в Нідерландах [37]. Установка з виробництва водню буде експлуатуватися компанією Alliander і буде пов'язана з сонячним парком, що розташований неподалік, потужністю 50 МВт, яким керує компанія Groenleven. Зелений водень, що виробляється на новому підприємстві, закуповуватиметься місцевою компанією таксі Kogt та постачальником палива OrangeGas за невідомою ціною. «Очікується, що щороку можна буде виробляти 100 000 кг водню, що достатньо приблизно для 10 мільйонів чистих кілометрів поїздки легковим автомобілем». GroenLeven вивчатиме можливості зберігання та використання «зеленого» водню для інших цілей [37].

Водень особливо важливий для переробної промисловості. Зараз він використовується в основному для виробництва добрив, але в майбутньому його можна буде застосовувати і у високотемпературних процесах, таких як виробництво сталі, для яких використовується природний газ або вугілля. Крім того, водень відіграватиме важливу роль у мобільності, наприклад, для

міжміських автобусів, яким доводиться долати великі відстані та де електромобілі не є вирішенням проблеми [38].

Водень, імовірно, стане важливою заміною вуглецю як відновник металургійної промисловості для таких процесів як виробництво сталі. Монолітний термоплазмовий процес для виробництва сажі та водню – подальший розвиток процесу, розробленого компаніями Kvaerner та SINTEF – є єдиний процес виробництва бірюзового або блакитного водню, який досягнув промислового рівня. Рентабельність бірюзово-водневих процесів дуже залежить від отримуваних цін на вуглецеві продукти та місцевої доступності, та цін на електроенергію і природний газ. Якщо процес працює на біометані, отриманому в результаті анаеробного органічного зброджування відходів, водень та вуглець, вироблені в процесі, можна вважати вільними від CO₂, якщо електрична енергія надходить із низьковуглецевих джерел енергії. Видається можливим розробити процес для виробництва водню та вуглецю без викидів CO₂, необхідних для майбутнього металургійної промисловості [39].

Результати показують, що потенційний діапазон світового попиту на водень зростає, становлячи від 73 до 158 Мт у 2030 році, від 73 до 300 Мт у 2030 році, 73 – 300 Мт у 2040 році та 73 – 568 Мт у 2050 році [39].

1.1.6. Передумови для переходу на водневі джерела та технології з урахуванням потенціалу України

Слід зазначити, що для всебічного та сталого переходу до водневих джерел енергії необхідно створення та побудова необхідної інфраструктури [1, 2].

Розглядаючи потенційно можливу трансформацію вуглецевої економіки до водневої з використанням «зеленого» водню, представляється можливим виділити наступні фактори впливу: технологічні, політичні, економічні, природні-кліматичні, соціальні. Всі вони в тій чи іншій мірі в кінцевому результаті будуть впливати як на вартість «зеленого» водню, так і на структуру виробничих витрат. Для виділення факторів, що впливають на вартість «зеленого» водню, на рівні виробничого циклу, розглянемо

основні елементи, що входять у виробничу структуру отримання зеленого водню [40, 41]:

- Сонячна або вітроенергетика, яка генерує «чисту» електроенергію;
- Електролізер, основне технологічне обладнання, що використовується для отримання водню методом електролізу;
- Водний ресурс, який використовується для виділення водню з води;
- Земельний ресурс для розміщення виробничих потужностей і допоміжних об'єктів;
- Робочий персонал, що обслуговує процес виробництва.

Одним із перспективних напрямків є виробництво водню з використанням електрики з *відновлювальних джерел енергії* (ВДЕ), а саме вітрової та сонячної [41].

За даними ПрАТ НЕК «Укренерго», встановлена потужність ВДЕ лише за рік зросла у два рази. З 2,9 ГВт у червні 2019 року до 5,8 ГВт у червні 2020 року. І вже на кінець листопада 2020 року перевищила 6,3 ГВт. Водночас енергетична система України не може без наслідків прийняти таку кількість енергії з відновлюваних джерел.

Крім того, ВДЕ не виробляють енергію стабільно. Це пов'язано з природними умовами: у темний час доби немає сонця, а швидкість вітру не завжди достатня для вироблення електроенергії. Рівень споживання електроенергії також не є постійним. Піковий – вдень і низький – уночі. Тож у періоди «пікового» виробництва, але при цьому слабкому споживанні, електроенергію від ВДЕ можна використовувати для електролізу «зеленого» водню. Водночас той же самий водень електростанції можуть в пікові години використовувати для виробництва електроенергії. Такий собі взаємозамінний цикл.

Проте для того, щоб він запрацював, Уряду необхідно стимулювати власників вітрових і сонячних станцій, а також включати в будівництво електролізери і паливні елементи.

До речі, згідно «Атласу енергетичного потенціалу відновлювальних джерел енергії України» (див. додаток А) річний потенціал виробництва водню в Україні в еквіваленті енергетичних

одиниць може складати від 340 млрд кВт-год при базовому сценарії та до 500 млрд кВт-год – при оптимістичному. Вагомі цифри. Особливо якщо зауважити, що річний рівень споживання природного газу в Україні становить приблизно 300 млрд кВт-год, то навіть при базовому сценарії водень може його замінити.

Атомні електростанції як джерело енергії для гідролізу водню. В Україні наразі діють 4 атомних електростанції: Південно-Українська, Запорізька, Рівненська і Хмельницька [42]. Всі вони мають функціонувати у стабільному режимі, тобто з певним базовим навантаженням – коли треба виробити певну сталу кількість енергії. А при цьому так як із енергією від ВДЕ у певні періоди відбувається перевиробництво енергії і утворюється її надлишок, який можна направити на гідроліз водню.

Добування водню. Ще у березні 2019 року вийшла наукова монографія «Обґрунтування пошукової технології водневих скупчень і геодинамічних явищ (нафтогазоносні регіони, шахтні поля)» [43], у якій зокрема описується створена вченими за даними геолого-структурних-термо-атмогеохімічних та аерокосмічних досліджень нова схема нафто-газо-гідро-геологічного районування України, яка дозволила визначити аномально-високі точки концентрації водню, як поновлюваного енергетичного джерела. При цьому водень, в якості головного складового елементу, у пошуковій практиці використовувався вперше. Звичайно, не чистий водень, а його аномальні концентрації у суміші з природним газом.

Вчені зробили відкриття. Виявляється, що перспективними для видобутку водню є діючі та закриті шахти Донбасу і Львівсько-Волинського басейну. Так, на об'єктах досліджень: Томашевська площа, Лисичанські купола у Донецькому басейні, шахта «Степова», «Лісова» у Львівсько-Волинському басейні значення водню на 2-3 порядки перевищували значення того ж метану.

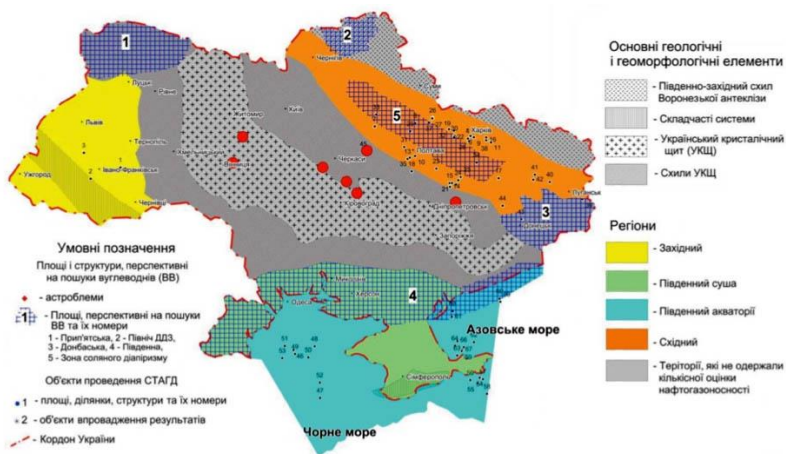


Рис. 23. Перспективні площі зв даними геолого-структурних-термо-атмогеохімічних та аерокосмічних досліджень для впровадження в виробництво за технологією СТАГД [41].

Перспективними для видобутку водню вважають Дніпровсько-Донецьку западину, площі у межах Прикерченського шельфу і континентального схилу Східно-Чорноморської западини.

Крім того, в Україні є окремі водневі дегазаційні структури з великим потенціалом. Вчені Національної академії наук України пов'язують можливі родовища водню з базальтовими структурами Рівненської області.

Зберігання і транспортування водню. Одними із основних проблем водневої енергетики є транспортування і зберігання водню. Адже він відрізняється підвищеною проникністю і легко вступає у реакцію. Наприклад, водень здатен зробити металевий сплав крихким за 10-20-річний проміжок часу.

Більш докладну інформацію про вплив водню на властивості деяких сплавів можна з наступних джерел [44 - 71].

Проблемами вивчення водневої стійкості матеріалів, наприклад, займаються в Фізико-механічному інституті ім. Г.В. Карпенка НАН України.

Тема 2. АВТОМОБІЛЬНИЙ ВОДНЕВИЙ ТРАНСПОРТ

2.1. Легкові водневі автомобілі

Перша згадка про «воднемобіль» відноситься до 1807 року, коли француз Франсуа Ісаак де Рівас (фр. François Isaac de Rivaz) запатентував саморушній візок з ручним приводом клапаном, що дозволяв дозувати водень і повітря [1, 2].

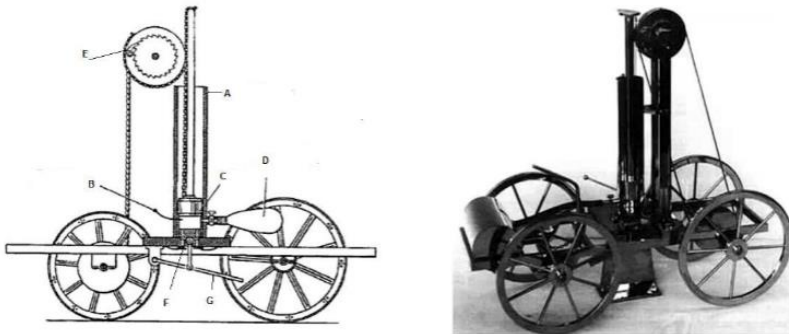


Рис. 24. Автомобільний екіпаж де Ріваса (1807) [2 - 4].

Двигун автомобільного екіпажу де Ріваса працював на водні, мав шатунно-поршневу систему роботи й іскрове запалювання, як у сучасних ДВЗ. Циліндр приводився в рух детонацією суміші водню і кисню електричною іскрою. Іскра подавалася в ручну коли поршень повністю опускався. Даний примітивний двигун мав дуже низький ККД і не був комерційно успішним [4].

Паливний елемент створює електрику, перетворюючи енергію, що виділяється, коли позитивно заряджені іони водню реагують з киснем. Цей принцип був вперше продемонстрований понад 200 років тому в 1801 році [6].

Паливні елементи були відкриті британцем Уільямом Робертом Гроув в 1839 році [2]. Цей випускник Оксфорда показав, що процес електролізу – розщеплення води на водень і кисень під дією електричного струму – оборотним. Іншими словами, водень

і кисень можуть бути з'єднані хімічним шляхом з утворенням електричних зарядів. Побудоване Гроувом обладнання було досить простим: два електроди розміщувалися в камері, в яку подавалися під тиском обмежені порції чистого водню і кисню. В силу невеликих обсягів газу, а також завдяки хімічним властивостям вугільних електродів в камері відбувався не вибух, а повільна реакція з виділенням тепла, води й, найголовніше, з утворенням різниці потенціалів між електродами [7].

На початку 1960-х років паливні елементи були застосовані до практичної роботи, їх почали використовувати супутники НАСА (NASA).

Робота над Електрованом (GM Electrovan) (рис. 25) розпочалася в січні 1966 року і була завершена вчасно для демонстрації на шоу «Сила прогресу» (Progress of Power show) в жовтні. Команда з 200 робітників працювала в три зміни на добу, щоб вкластись в термін (дедлайн) [6].

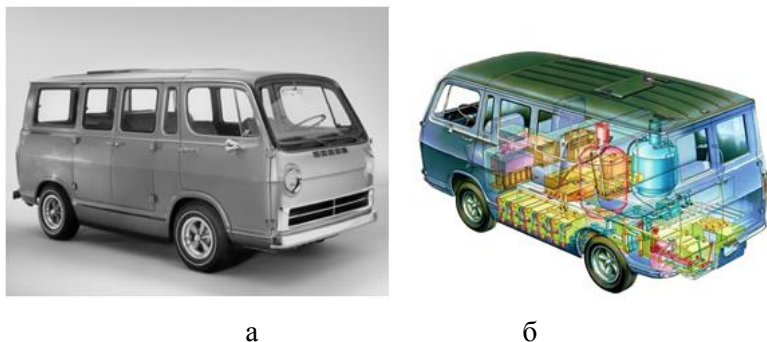
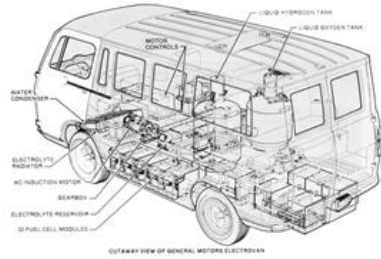


Рис. 25. GM Electrovan Concept '1966 [6, 8, 9].

Хоча «струнка» і «сексуальна» спортивна машина, можливо, була б більш привабливою базою для системи паливних елементів, команді довелося використовувати фургон просто тому, що пакет був настільки величезний, що зайняв весь вантажний простір фургона (рис. 25 б). Керував проектом доктор Craig Marks (рис. 26) [10].



а



б

Рис. 26. GM Electrovan Concept '1966 [10].

Він був першим автомобілем на водневих паливних елементах. Паливну установку розробила компанія Union Carbide, вона була заснована на застосуванні рідкого водню і кисню для вироблення електрики, яке і приводило в рух колеса. Усередині фургона розташовувалися дві великі місткості, одна для кисню й одна для водню. Автомобіль розвинув досить не погану швидкість в 63-70 миль на годину. Запас ходу становив приблизно 120 миль. Після ряду випробувань і презентацій серед журналістів, а так само тривалому процесу експлуатації на території заводів General Motors, компанія прийшла до висновку про недоцільність масового виробництва через відсутність інфраструктури та високу ціну проект [10].

У 1979 році компанія BMW випустила перший автомобіль (рис. 4), який цілком успішно їздив на водні, який випускав з вихлопної труби водяну пару. В епоху посилення боротьби зі шкідливими вихлопами машина була сприйнята як виклик консервативному автомобільному ринку. Слідом за BMW в екологічну сторону потягнулися й інші виробники. До кінця століття кожна автокомпанія, що себе поважає, мала в запаснику хоча б один концепт-кар, який працює на водневому паливі [11, 12].

Автомобілі на водневому паливі вже виробляються. Серед компаній, які виготовляють такі автомобілі – Toyota, Honda, Hyundai ті ін. Розробкою автомобілів на водневому паливі займаються також Daimler, BMW, Audi, Ford, Nissan і ін.



Рис. 27. Автомобіль на водні BMW 520h. Джерело зображення: BMW Group AG [12].

У 1984 році компанія BMW представила експериментальний седан BMW 745i з двигуном, що працює на водні. З того часу компанія неодноразово демонструвала оригінальні конструкції з використанням водню. У 1997 році компанія BMW почала дослідження в області створення водневих паливних елементів (fuel cell). У 2006 році компанія налагодила малосерійний випуск седана BMW Hydrogen 7 [13].



Рис. 28. Спортивний одномісний автомобіль BMW H2R – зірка автосалонів нульових років. Його двигун працював на водні.



Рис. 29. BMW Hydrogen 7 [14].

BMW Hydrogen 7 став одним з самих передових автомобілів, тому коштував приблизно півтора мільйона доларів [15].

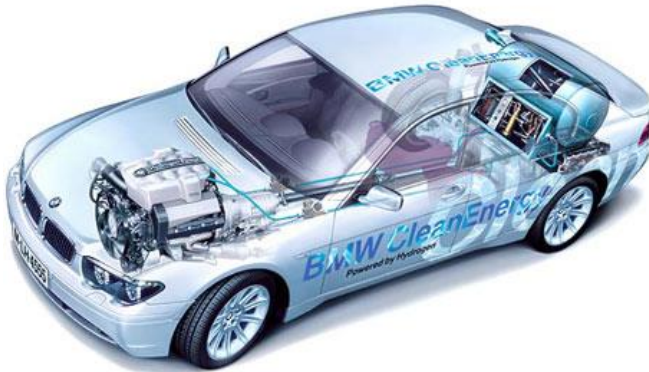


Рис. 30. BMW Hydrogen 7 [15].

В процесі розробки Hydrogen 7 були поєднані воднева технологія і характерні для моделей баварської марки динамічність, плавність роботи й люксове оснащення. Потужність інновацій-

ного 12-циліндрового силового агрегату, який працює як на водні, так і на звичайному бензині, становила 191 кВт/260 к.с. при 5100 об/хв і крутному моменті 390 Нм при 4300 об/хв [14].

Седан розганявся до 100 км/год за 9,5 сек. Максимальна швидкість машини складала 230 км/г і обмежувалася електронікою. Завдяки системі управління роботою мотора його потужність залишалася однаковою незалежно від виду споживаного палива. При цьому, за інформацією BMW, на 100 км в середньому витрачалось всього 3,6 кг рідкого водню (в BMW відзначають, що це еквівалентно 13,3 л традиційного палива), в той час як при русі автомобіля на бензині на 100 км споживається 13,6 л палива. Hydrogen 7 оснащувався шестиступінчастою автоматичною трансмісією з приводом на задні колеса. Довжина BMW Hydrogen становить 5179 мм при ширині 1902 мм і висоті 1489 мм [14].



Рис. 31. 12-циліндровий двигун BMW Hydrogen 7 об'ємом 6 літрів [16].

Водень зберігався в рідкій формі при температурі не вище -253°C . Бак для зберігання водню двошаровий. Між шарами в вакуумі розташовані 70 шарів спеціальної піни. BMW спільно з South German Technical Inspection Authority (TÜV) провели серію

випробувальних тестів для системи зберігання водню. Тести розробляла Magna Steyr (дочірнє підприємство Magna International). В ході випробувань водневий бак руйнували під високим тиском, нагрівали на відкритому вогні до температури 1000°C протягом 70 хвилин, деформували твердими й важкими предметами.

До травня 2007 року BMW зробила 100 автомобілів Hydrogen 7. З них 70 продані в лізинг в Європі, а 25 – в США. Всього автомобілі BMW Hydrogen 7 до березня 2008 року пройшли в усьому світі понад 2 мільйонів км. 31 березня 2008 BMW представила монопаливну версію BMW Hydrogen 7, що працює тільки на водні [17].



Рис. 32. Шестилітровий 12-циліндровий V-подібний двигун автомобіля BMW H2R, адаптований під живлення воднем.

Toyota Mirai вперше був представлений публіці в листопаді 2013 року на Токійському автосалоні [18]. Це водневий гібридний автомобіль на паливних елементах. 16 листопада 2014 року президент компанії Toyota Акіо Тойода офіційно оголосив, що автомобіль буде називатися Toyota Mirai. Автомобіль заснований на концепт-карі Toyota FCV [18]. Продажі в Японії стартували 15 грудня 2014 за ціною 6 700 000 японських ієн (близько 57 500 доларів США), а в США і Європі в четвертому кварталі 2015 року [18, 20].



Рис. 33. Toyota Mirai [21].

Обсяг продажів Toyota Mirai в США склав 1 700 автомобілів у 2018 році й 1 502 автомобілі у 2019 році [20]. У жовтні 2019 року компанія Toyota представила друге покоління Toyota Mirai 2021 модельного року [22]. Технічні характеристики: модель кузова – ZBA-JPD10-CEDSS. Мінімальний дорожній просвіт – 130 мм. У базовій комплектації йдуть легкосплавні диски R17, а розмір шин 215/55. Мінімальний радіус повороту – 5,7 м.

Серцем автомобіля є гібридна установка на водневих паливних елементах під назвою FC stack, модель установки – FCA110. В результаті хімічної реакції взаємодії водню і кисню виробляється електроенергія. Реакція відбувається без процесу горіння. Максимальний ККД перетворення водню в електричний струм складає 83%. Для порівняння 1,3-літровий бензиновий двигун VVT-iE компанії Toyota, який був розроблений на початку 2014 року має максимальний ККД 38%, що зараз є найвищим показником у світі серед автомобільних ДВЗ. На практиці ж, середньостатистичний двигун компанії Toyota має ККД 23% [22].



Рис. 34. Toyota Mirai fuel cell sedan [21].

Максимальна потужність установки становить 114 кіловатів. Вторинна батарея – це нікель-метал-гідридний акумулятор з максимальною вихідною потужністю 21 кіловат. В акумуляторі зберігається енергія від рекуперативного гальмування. У разі, коли автомобілю необхідна максимальна потужність, наприклад при різких прискореннях, на допомогу електромотору приходить енергія вторинного акумулятора. На автомобіль встановлюється синхронний електродвигун змінного струму, розроблений компанією Toyota. Даний двигун працює як генератор при гальмуванні, регенеруючи енергію у вторинний акумулятор. Максимальна потужність електродвигуна становить 113 кіловатів (154 л. С.). Електричний струм, що виробляється на паливних елементах проходить через підвищувальний перетворювач, в якому постійний струм перетворюється в змінний, а напруга збільшується до 650 вольтів [21].

Блок управління живленням складається з інвертора, який перетворює постійний струм в змінний. Блок живлення здійснює точний контроль над вихідною потужністю паливних елементів в залежності від стилю водіння. Під днищем автомобіля розташовуються 2 резервуари для зберігання водню під тиском 70 МПа. Один балон знаходиться в передній частині автомобіля, його ємність (місткість) 60,0 літрів, а другий балон місткістю 62,4 літра знаходиться ззаду. Всього у два балони вміщається до 5 кілограмів водню. Максимальна дальність поїздки на одній заправці ста-

новить 650 кілометрів в режимі JC08 (японський метод вимірювання витрати палива). Час повної заправки двох балонів становить 3 хвилини. Максимальна швидкість 175 км/г [21].

У Франкфурті (2019 р.) дебютував BMW X5 і Hydrogen Next – концепція, яка демонструє можливості впровадження технології паливних елементів, що працюють на водні. У 2022 році компанія має намір запустити дрібносерійне виробництво таких автомобілів, а масовий випуск почнеться не раніше, ніж у 2025 році [24, 25].



Рис. 35. BMW X5 і Hydrogen Next [24, 25].

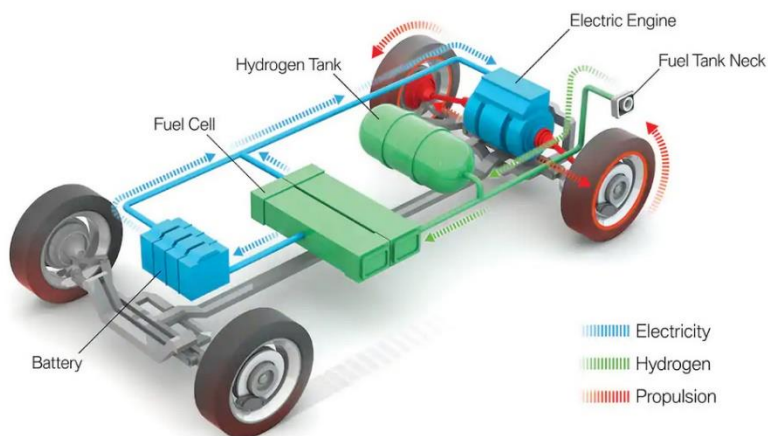


Рис. 36. Компонівка «водневого» автомобіля [25].

В області приводної системи з використанням технології водневих паливних елементів BMW співпрацює з Toyota. Компанії підписали відповідну угоду про партнерство ще у 2016 році [24].

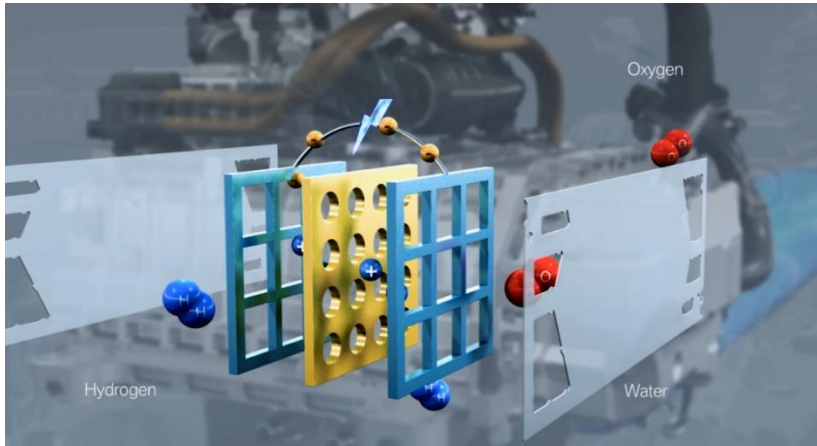


Рис. 37. Схема роботи водневого паливного елемента [25].

У січні 2017 року BMW Group і Toyota об'єдналися з 11 провідними енергетичними, транспортними й промисловими компаніями для запуску глобальної ініціативи, що отримала назву «Воднева рада». Її метою стало «створення єдиного бачення енергетичної революції» і її просування. Сьогодні до складу ради входять приблизно 60 компаній [24].

Китайські компанії до 2023 року планують вкластись у водневу галузь понад 17 млрд доларів. Уряд хоче, щоб за 10 років дорогами Піднебесної їздив 1 млн водневих авто. Основні підприємства, що працюють у цьому напрямку – Anhui Mingtian Hydrogen Energy Technology Co., Shanghai Shenli Technology Co., Sunrise Power Co. та Guangdong Nation-Synergy Hydrogen Power Technology [29].

Компанія Grove Hydrogen Automotive Co Ltd вперше продемонструвала новий розкішний автомобіль з водневими палив-

ними елементами на презентації в своїй штаб-квартирі в китайській Кремнієвій долині в Ухані (кит. упр. 武汉, пиньинь: Wūhàn) [27].



Рис. 38. Водневий хетчбек з запасом ходу більше 1000 км від Grove Hydrogen Automotive [27].

Серійно випускати автомобілі під маркою Grove китайці мають намір вже з 2020 року. Свою назву бренд отримав на честь англійського фізика Вільяма Роберта Гроува (про нього мова йшла на початку публікації), винахідника гальванічного елемента.

Представлений хетчбек обладнаний силовою установкою на водневих паливних елементах і здатний на одному баку проїжджати понад 1000 кілометрів (водневий Honda Clarity Fuel Cell проїжджає 590, а Toyota Mirai – 502 кілометри). Кузов автомобіля зроблений з вуглепластику, а всі чотири двері відчиняються вгору і в бік [27].

Проект машини на паливних елементах з'явився у китайських розробників у вересні 2016 року. Їх первістком став спортивний Activity Vehicle, який продемонстрував на Шанхайському автосалоні у квітні 2019 року неперевершений запас ходу на одній

заправці. Уже в найближчі кілька років компанія має намір випустити цілий ряд моделей на своїй інноваційній технологічній платформі [28, 29].



Рис. 39. Китайський водневий автомобіль [28].

Grove Hydrogen вийшла з тіні на Шанхайському автошоу, де представила три моделі водневих автомобілів. Це стандартна для початківців китайських стартапів лінійка: два кросовера, що відрізняються розмірами і купе [28]. Також є спортивний варіант Granite зі зміненим дизайном кузова [29].

Заправка водневого бака займає всього лише три хвилини, а при їзді з вихлопної труби виходить екологічно безпечна водяна пара. Багато хто може подумати, що Grove Obsidian схожий на пересувну водневу бомбу, але це помилкова думка. Паливний бак спроектований так, щоб витримувати будь-які аварії. Якщо в ньому утворюється отвір, водень випливає з нього в стислому рідкому вигляді, згоряє за півтори хвилини і розігріває кузов максимум до 47 градусів Цельсія [29].

А з 2021 року Grove сподівається вивести на дороги країни близько 10 000 своїх автомобілів. Уже названа приблизна ціна старшої моделі кросовера – близько \$ 112 тис., що можна порівняти з Tesla Model X.

Керівництво Grove сподівається, що до моменту появи їх автомобілів на дорогах проблем з числом заправних станцій не буде. Відомо, що уряд підтримує плани державних і приватних

компаній щодо розгортання мереж водневих заправок. Якщо програми реалізують, то в Шанхаї до 2025 року буде близько 50 станцій [28].

Компанія Mingtian Hydrogen, назва якої перекладається як «Водень завтрашнього дня», планує інвестувати 363 млн доларів у створення промислового парку в провінції Аньхой. Серійне виробництво водневих паливних елементів тут має розпочатися наступного року. До 2022 року щорічно буде випускатися 100 тис. комплектів, а до 2028 року – 300 тис. [29].

Концерн Mercedes-Benz також випустив власний водневий електрокар [30, 31]. Максимальна швидкість становить 160 км/год.



Рис. 40. Водневий електрокар від Mercedes-Benz [31].

Mercedes-Benz GLC F-CELL – лунікальний гібрид «плагінів», окрім електрики, він також може працювати на чистому водні. Позашляховик – це повністю електричний автомобіль, придатний для повсякденного використання, який не викидає CO₂ під час роботи. Взаємодія між акумулятором і паливом, довгий діапазон і короткі терміни заправки роблять GLC F-CELL автомобілем, який може похвалитися високою повсякденною практичністю. Дві цистерни з вуглецевого волокна у підлозі автомобіля вміщують 4,4 кг водню. Завдяки глобалізованій стандартизованій технології на 700 барів резервуар водню можна поповнити протягом всього трьох хвилин – так швидко, як заведено, коли заправляють автомобіль з двигуном, що працює на бензині чи дизелі.

При споживанні водню близько 1 кг/100 км GLC F-CELL досягає приблизно 430 кілометрів за циклом NEDC; в гібридному режимі він додатково забезпечує до 51 км від повністю зарядженого акумулятора. Водночас, потужність складає 155 кВт та допомагає забезпечити високу динаміку руху [30, 31].

Щоб підтримати перехід до нульових викидів, компанія Renault пропонує повний спектр продуктів і послуг. Компанія Renault випустить в цьому році екологічно чистий фургон Master ZE Hydrogen (рис. 16). Також з'явиться в продажу електрична версія з запасом ходу 160 км [32, 33].

Абсолютно новий Renault Kangoo Van – це інноваційний фургон з динамічним дизайном, який став ще більш комфортабельним і технологічним. Так, зокрема, машина отримала інноваційну функцію «Sesame Open by Renault» [32].

Згідно з попередніми даними, автомобільний фургон буде працювати завдяки електродвигуну і акумулятору, але до них додаються також і паливні елементи. Дальність ходу водневого Renault Master ZE Hydrogen складе майже 600 км. Ця версія автомобіля може використовуватись компаніями, які займаються вантажними перевезеннями на великі дистанції.

Також є відомості, що Renault і американська фірма Plug Power уклали угоду про будівництво у Франції спільного заводу, який зможе виробляти до 30% модифікацій сегмента LCV на паливних елементах від усього обсягу ринку в Європі. На цьому підприємстві з'являться потужності для випуску сучасних механізмів паливних елементів і їх інтеграції в автомобілі.

Топ-менеджер бренду поділився інформацією, що за останні п'ять років Great Wall вклала в розробку технологій, пов'язаних з водневою енергією чимало коштів. А якщо бути точним, то близько 300 млн доларів. І це тільки початковий етап: засновник Great Wall вже заявив, що готовий протягом наступних трьох років вкласти ще близько (трьох мільярдів юаней) 456 млн. дол. в розвиток даного напрямку. Головна мета – до 2025 року потрапити в топ-3 лідерів з продажу водневих мобілей.



Рис. 41. Автомобільний фургон компанії Renault Master ZE Hydrogen [34].

Водневий двигун з паливними елементами і без них, заправляється швидше, ніж заряджається акумулятор електромобіля, проте він не такий вже й безпроблемний. Установка для виробництва водню велика за ціною, як і мотор, і необхідно пам'ятати про вибуховність водню, а привід на колеса не такий прекрасний, як у електричних побратимів.

Більш широке впровадження водневого палива поки стриmuється більш високою ціною водню в порівнянні зі звичним рідким і газовим паливом, відсутністю необхідної інфраструктури.

Проміжним рішенням можуть стати суміші традиційного палива з воднем. Водень може використовуватися для поліпшення займистості бідних сумішей в ДВЗ, що працює на традиційних видах палива. Наприклад, HCNG – суміш водню з природним газом.

Водневі паливні елементи можуть виробляти електричну енергію для електродвигуна на борту транспортного засобу, замінивши тим самим двигун внутрішнього згоряння, або застосовуватися для бортового живлення.

Основна перевага впровадження паливних елементів в наземні транспортні засоби (наприклад в автомобілях): передбачуваний високий ККД (коефіцієнт корисної дії). ККД сучасного автомобільного двигуна внутрішнього згоряння досягає 35%, а ККД водневого паливного елемента – 45% і більше. Під час випробувань автобуса на водневих паливних елементах канадської компанії Ballard Power Systems був продемонстрований ККД в 57% [35].

Експериментатори з Іспанії і Норвегії в 2017 надали новий спосіб, щоб змінити метан (він застосовується, як первинний газ для моторів машин) в водень з практично ніякою втратою енергії.

Система спирається на процес виробництва водню як паровий риформінг. Поки що, сьогодні розігрітий до 700-1000 градусів за шкалою Цельсія пар реагує з метаном (мережевим газом) під великим тиском в наявності каталізатора на основі нікелю або платини. Проблема в тому, що тільки 65-75 % енергії метану захоплюється як водень і процес все ще випускає велику кількість CO_2 – близько половини того, що наш автомобіль створює при спалюванні бензину.

Доповнивши процес установкою кахельної мембранної тканини, експериментатори змогли забезпечити генерацію водню з мережевого газу за один крок «з практично нульовою втратою енергії», як сказали вони. Мембранна тканина зроблена від барію, цирконію, ітрію та інших рідкісних компонентів, і може зробити електричну різницю потенціалів для електричного мотора через власну поверхню. В процесі, суміш пари і метану зробить транзит на зворотну сторону протонів, створюючи іонізований водень.

У фінішному результаті вони отримують концентрований водень, що немає домішок, який вже стискається електрохімічно при конкретній температурі до 50 бар (як пишуть – до 750 фунтів на кв. дюйм). З маленькою обробкою газ потім готовий до застосування в паливних елементах ТЗ або для промислових цілей. Команда зазначає, що якщо метану в цих обставинах потрібно

менше, щоб виконати таке ж за кількістю водню, то установка повинна робити менше CO₂. Система зберігає близько 88 % енергії метану, завдяки цьому «нульова втрата енергії» в дійсності буде приблизно 12 відсотків втрат.

Вчені також відзначають, що цей процес відмінно масштабується, можна робити водень зі своїх ліній мережевого газу за допомогою маленького генератора, умовно кажучи-власними руками. Це дасть можливість заправити водневу машину вдома, також, ви можете це виконати з електромобілем, знижуючи необхідність в наявності сфери послуг складної заправки воднем (H₂). І цей напрямок в транспортному автомобілебудуванні дає можливість значно зменшити викиди тепличних газів. Крім того, в набагато більшому масштабі було б краще зберігати CO₂ під землею, так як він повністю відділяється від водню.

Експериментатори відзначають, що застосування водню для транспорту – це дешево якщо порівнювати з застосуванням сотнями тон добрив в інших галузях промисловості, і це дасть можливість значно зменшити викиди тепличних газів. Крім того, в набагато більшому масштабі було б краще охопити і зберігати підземний CO₂, так як він повністю відділяється від водню.

З іншого боку, є причина, по якій нафтові компанії все-таки змушені підтримувати водневі машини, а не електричні. Водневі паливні деталі також споживають велику кількість викопного палива із-за трансформації метану, також на поточний момент планета вже не може поглинати набагато більше тепличних газів. Консорціум 13 компаній з авто-мобільної та енергетичної промисловості з'єднується в «Водневу Раду», щоб направити застосування водню як палива майбутнього. Як вони, наприклад, відзначають, перехід на водень потрібен для нашого продовження виживання. Дуже ймовірно, що в недалекому майбутньому, як гірші, так і відмінні машини за викидами, підуть в минуле.

Основними компонентами автотранспортного засобу є електрохімічний генератор (ЕХГ) на водневих паливних елементах, буферна акумуляторна батарея, електричний мотор-генератор, що управляє і силова електроніка – остання призначена для комутації силових електричних ланцюгів.

При динамічному розгоні батарея приходить на допомогу ЕХГ. Крім того, вона використовується для запуску генератора, а також для накопичення енергії, що виробляється при гальмуванні (режим рекуперації).

Крім водню, для функціонування паливних елементів необхідний кисень. Він надходить в ЕХГ разом з повітрям, який попередньо очищається від вуглекислого газу. А ключем до успіху служить вдосконалення характеристик паливних елементів.

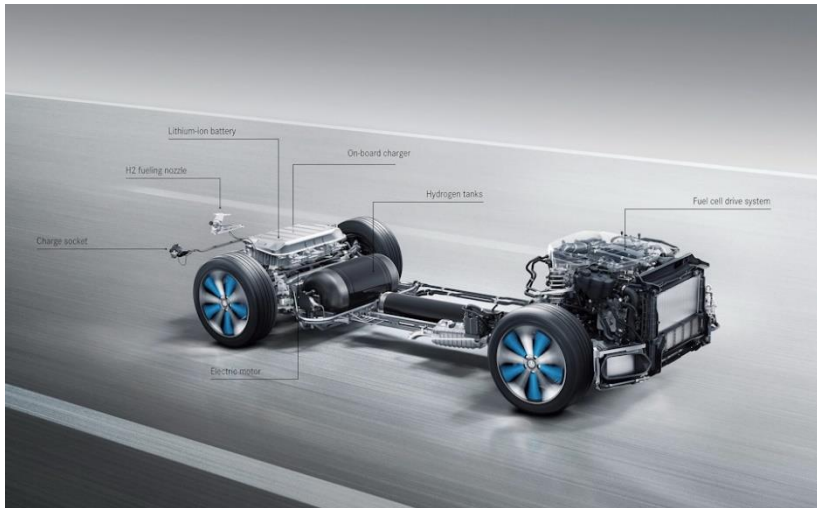


Рис. 42. Принципова компоновка автомобіля FCV (fuel cell vehicle).

Наслідки такого застосування водню – водяна пара. При цьому ніяких токсичних компонентів або парникових газів не утворюється. А якщо отримувати водень методом електролізу, то взагалі чудово – відбувається круговорот води.

Так, в екологічному відношенні паливні елементи краще водневих ДВЗ, тому більшість досліджень і розробок йде саме в напрямку ТЕ.

В автомобілях з ТЕ в механічну роботу перетворюється електрична енергія. Двигун у цих транспортних засобів – електричний. А електрику виробляють ті самі водневі паливні елементи.

А якщо двигун електричний, значить, мова про електромобіль? Саме так. Це електромобіль з автономною електростанцією на борту.

Можна уявити і формальні, якщо хочете – юридичні докази. Читаємо уважно Міжнародний стандарт ІЕС / TS 62282-1: 2010 «Технології паливних елементів. Частина 1. Термінологія».

Цитуємо: «ТСТЕ є електричний транспортний засіб (електромобіль), в якому енергетична система на паливних елементах подає живлення на електродвигун для приведення транспортного засобу в рух».

Так що як не крути, автомобілі з водневими ТЕ – це електромобілі. І двигуни у них – електричні, а не водневі.

А ось у описаного вище BMW H2R двигун дійсно водневий. Тому що це ДВЗ, що працює на водні. Точно також, як ДВЗ, що працює на бензині, ми назвемо бензиновим двигуном, на дизельному паливі – дизельним, а на метані – газовим.

Серед перспективних напрямків автомобілебудування є запровадження технологій автономного водіння.

Колона з 5 повністю автономних автомобілів, з яких три – кросовери NEXO і ще два – седани Genesis G80, здійснила перший в світі автопробіг, який став демонстрацією можливостей системи автономного водіння 4 рівня і новітньої системи передачі даних 5G. Досі автомобілі марки Hyundai з функцією автономного водіння випробовувалися з обмеженою швидкістю на деяких ділянках міських доріг [35].

Під час подорожі з Сеула в Пхьончхан кросовери розвивали швидкість у 100-110 км/год (максимально дозволена швидкість в Південній Кореї). При пересуванні по автомагістралях автономні NEXO з легкістю змінювали смуги руху, здійснювали обгони попутних транспортних засобів, проїжджали перехрестя з круговим рухом. Системи розпізнавання дорожніх знаків, сигнала-

лів світлофора і пішоходів, що входять до інноваційного комплексу систем допомоги водієві ADAS, допомагали автономним кроссоверам під час пересувань містами.



Рис. 43. Водневий автомобіль Hyundai Nexo на Франкфуртському автосалоні.



Рис. 44. Hyundai NEXO - перший у світі повністю автономний водневий кросовер [35].

Одним з випробувань для NEXO стала їзда в тунелі протяжністю кілька кілометрів, де сигнал GPS, завдяки якому автомобіль орієнтується в просторі, недоступний – і кросовери успішно його подолали, використовуючи тільки зовнішні сенсори.

Hyundai Motor Group готується до впровадження технології автономного водіння 4 рівня в так званих «розумних» містах із спеціально підготовленою інфраструктурою.

2.2. Вантажні водневі автомобілі

Автомобілебудівна корпорація Toyota у 2013 році почала активно просувати водневі технології, які поширились з серійного автомобіля Toyota Mirai [1-7]. Також корпорація Toyota разом із дочерньою компанією Ніно домовилась про спільну розробку вантажівки, яка буде їздити на водні [7].



Рис. 45. Heavy-Duty Fuel Cell Truck [7].

У вантажівці будуть використані ті ж паливні елементи, що і в легковому авто компанії – Mirai [2-6, 8]. Але паливних елементів і баків для водню у вантажівки буде більше.

Крім паливних елементів, вантажівка буде оснащена електричним двигуном, літій-іонним акумуляторним блоком і резервуаром для зберігання водню великої місткості. Очікується, що однієї заправки вантажівки вистачить приблизно на 600 км шляху.

У Toyota вважають, що для вантажівок, які щодня проїжджають кілька сотень кілометрів, електричний двигун і акумулятори підходять не кращим чином. А водень дозволить досить швидко заправляти такі машини, що гарантує велику автономність [8].

Попередню версію цієї вантажівки Toyota представила в 2017 році. Вона мала запас ходу 320 км. У поліпшеному варіанті цей показник вдалося збільшити майже до 500 км. Потужність двигуна – 670 к.с., а максимальний обертовий момент –1800 Н*м.



Рис. 46. Beta Truck від японського автовиробника [8].

Також Toyota повідомила, що у неї буде спеціально доопрацьоване шасі, яке забезпечить «оптимальне упакування» для паливних елементів і відповідних компонентів. Конструкція Nino Profia також отримає «всебічне зниження ваги» для забезпечення достатньої вантажопідйомності [9].

Над створенням вантажівок також працюють в Nikola Motor Company, що знаходиться в Фініксі, штат Арізона (США). 18-колісна гібридна вантажівка Nikola Motor Company на водневих паливних елементах має потужність в 1000 кінських сил. У неї встановлений паливний бак з вуглецевого волокна. Запас ходу без підзарядки становить приблизно 1200 км, а маса вантажівки – 9 тонн. Представники автоконцерну підкреслюють, що для створення електровантажівки з такою ж потужністю і запасом ходу буде потрібно літій-іонний акумулятор, який збільшить його масу приблизно на 2,2 тону [10].

Пивоварна компанія Anheuser-Busch InBev планує в найближчому майбутньому відмовитися від вантажівок з двигуном внутрішнього згорання і вже замовила у Nikola Motor Company 800 гібридних фур. Виробник пива Budweiser візьме гібридні вантажівки в оренду на 7 років. Вартість оренди одного тягача (враховуючи паливо) складе до 1 млн \$. Якщо автоконцерну Мілтона вдасться вчасно поставити вантажівки, Anheuser-Busch InBev буде використовувати їх для перевезення пива Budweiser із Західного узбережжя в дистрибуційні центри, розташовані за сотні кілометрів звідти. Якщо виробник поставить пивоварній компанії 800 тягачів, вантажоперевізники начебто U.S. Xpress також оформлять передзамовлення на суму в 10 млрд \$ [10].

Водень може стати хорошою паливною альтернативою для вантажівок, які обслуговують порти США. Сьогодні екологи фіксують все більший рівень забруднення повітря в районі портів зокрема близько таких великих, як Лос-Анджелес і Лонг-Біч. Ці порти обслуговуються в цілому 16 000 вантажівками, і, за прогнозами, за найближчі 10 років це число подвоїться. Водневі ж технології дозволять пережити це подвоєння з меншою шкодою для навколишнього середовища [8].

Корейський конгломерат Hyundai Group інвестував \$ 6,7 млрд в розробку автомобілів на водневих паливних елементах. У липні виробник дизельних двигунів Cummins поглинув компанію Hydrogenics, яка займається виготовленням паливних елементів. У 2020 році гіганти автомобільної промисловості General Motors і Honda відкриють в Мічигані завод для масового виробництва паливних елементів, в будівництво якого вони інвестували \$ 85

млн. Японський автогігант Toyota відкриє в американському місті Лонг-Біч завод, на якому з коров'ячого гною будуть виробляти водневе паливо для вантажівок, розроблених спільно з автомобілебудівною компанією Kenworth [10].



Рис. 47. Вантажівки від Nikola Motor Company [10].

До 2028 року планується розширити мережу заправних станцій і побудувати 700 заправок для гібридних вантажівок по всій території США. Також планується, що вартість виробництва кілограма стисненого газоподібного водню буде знижена до \$ 2,5 (цей обсяг еквівалентний 3,7 літрам дизельного палива) [10].

Також є відомості, що Renault і американська фірма Plug Power уклали угоду про будівництво у Франції спільного заводу, який зможе виробляти до 30% модифікацій сегмента LCV на паливних елементах від усього обсягу ринку в Європі. На цьому підприємстві з'являться потужності для випуску сучасних механізмів паливних елементів і їх інтеграції в автомобілі [11].

Керівник дочірньої компанії концерну FTXT Energy Technology Co Чзан Тяньюй, повідомив про наміри Great Wall випускати водневі автомобілі [12, 13].

Топ-менеджер бренду поділився інформацією, що за останні п'ять років Great Wall вклала в розробку технологій, пов'язаних з водневою енергією чимало коштів. А якщо бути точним, то близько 300 млн доларів. І це тільки початковий етап: засновник Great Wall вже заявив, що готовий протягом наступних трьох років вкласти ще близько (трьох мільярдів юаней) 456 млн. дол. в розвиток даного напрямку. Головна мета – до 2025 року потрапити в топ-3 лідерів з продажу водневих мобілей.

Також в планах концерну Great Wall виробництво 49-ти тонних вантажівок на водневих двигунах. Перші 100 таких автомобілів планується виготовити найближчим часом. Основою для виготовлення автомобілів буде платформа L.E.M.O.N. (застосовується в нових позашляховиках Haval) вірніше її адаптована версія. Передбачувана потужність силових установок близько 270 кінських сил. Вони будуть модульної конструкції, що дозволить легко комбінувати різні варіації систем паливних елементів, батарей, самих двигунів, балонів з воднем [14].

Нині серед суперників бренду – Toyota і її модель Mirai. Багато інших компаній також розвиваються в цьому напрямку, наприклад, корпорація SAIC Motor має намір захопити 10% ринку автомобілів з водневим двигуном в КНР до 25-го року [15].

Займатися створенням водневих двигунів Great Wall почали через політику в Китаї. Влада активно сприяє розробці автомобілів, вантажівок і автобусів з водневими двигунами і навіть пропонують винагороду тим містам, де були досягнуті цільові показники впровадження. За планами за 10 років на дорогах Китаю має бути, як мінімум мільйон електромобілів, серед яких значна частка на водні.

З 28 по 31 жовтня 2019 року в Атланті відбулося шоу комерційних автомобілів – там-то і був презентований новий автопоїзд Hyundai HDC 6 Neptune.

Розповідати про потяг не будемо, зупинимося на тягачі. Головна його особливість – енергетична установка на водневих паливних елементах (TE), яка живить електромотори. Водень розміщується в восьми резервуарах, але це не межа – робота над компонуванням для збільшення обсягів палива триває.

Що стосується власне ТЕ, Hyundai планує побудувати достатні потужності для їх виробництва до 2030 року. У проект інвестується 6,4 млрд дол.



Рис. 48. Тягач Hyundai HDC 6 Neptune на паливних елементах.

Так чи потрібні ці паливні елементи? Чому не можна експлуатувати велику електричну вантажівку на батареях? Їздить на них легковий і легкий комерційний транспорт.

Можна, але недоцільно. За словами Сая Хун Кіма, віце-президента центру паливних елементів Hyundai, для забезпечення пробігу в 300 миль важкої вантажівки потрібно близько 8 т батарей. А воднева система, включаючи блок паливних елементів і баки для водню, важить близько 1,5 т.

«Використовуйте різницю у вазі для розміщення додаткового вантажу, виймайте прибуток», – робить висновок пан Кім.

Крім того, заправка вантажівки воднем порівнянна з заправкою дизельним паливом і вимагає набагато менше часу, ніж зарядка батарей. А значить, вантажі будуть доставлятися швидше, ніж на «розеткових» автомобілях.

Боротьба за покупця на ринку воднево-електричних вантажівок буде неабиякою. Hyundai HDC 6 Neptune стане серйозним конкурентом водневим тягачам Nikola.

Крім того, не варто скидати з рахунків чисто електричні тягачі Tesla Semi – вони теж хочуть свою частку ринку. І судячи з усього, вони її отримають.

А тут і японці підтягнулися. Авторитет Toyota Motor Corp., у транспортній водневої енергетики беззаперечний. Компанія виробляє Mirai – легковий автомобіль на водневих паливних елементах, розробляє комерційні автомобілі з ТЕ.

А ще Toyota створює електричні трансмісії на паливних елементах для компанії Kenworth. Зараз ці два автомобільні гіганти будують десять вантажівок класу 8 (це транспортні засоби з масою вище 33 000 фунтів або 14 969 кг) з нульовими викидами.

Вантажівки будуть використовуватися в комплексі «Порт Лос-Анджелес / Порт Лонг-Біч». Спеціалізація – перевезення контейнерів на плечі в 70 миль.

Вивіз сміття в населених пунктах – гостра проблема. У міському господарстві давно чекають інноваційних рішень, зокрема – екологічних і безшумних транспортних засобів. Дизелю тут робити нічого.

І ось в квітні 2019 року, на площі міста Брабанта (Нідерланди) була представлена комунальна техніка, що працює на водневих паливних елементах. А саме два великих сміттєвоза для обслуговування регіону Ейндховен.

Автомобілі побудовані компанією E-Truck Europe за підтримки фірми Hydrogenics. Працювати вони почали відразу після презентації.

Сміттєвози, що працюють на водневих паливних елементах, як не можна краще підходять для вирішення завдань міської екології. Вони мають нульову емісію, єдиний їх викид – водяна пара. І що важливо – вони безшумні!



Рис. 49. Комунальна техніка, яка працює на водні, ідеально підходить для міста.

Водень зберігається на борту автомобіля в резервуарі при тиску 350 бар. Водневі паливні елементи виробляють електроенергію, необхідну для тягових електродвигунів. На одній заправці сміттєвоз працює дві доби. Потім він всього за 10 хвилин заправляється на станції технічного обслуговування WaterstofNet в Хелмонді. І знову в дорогу – збирати відходи протягом наступних двох діб.

Компанія Nikola Motor Co. добре відома своїми трьома моделями Nikola One, Nikola Two і Nikola Tre («три» по-норвезьких).

Спочатку в допомогу батареям вантажівки Nikola One планували оснащувати «подовжувачем ходу» – газотурбінним бортовим генератором, але потім все ж зупинилися на ТЕ. Але для деяких ринків можливість використання газотурбінного генератора все ж залишили.



Рис. 50. Nikola One – первісток сімейства з трьох водневих тягачів фірми Nikola.

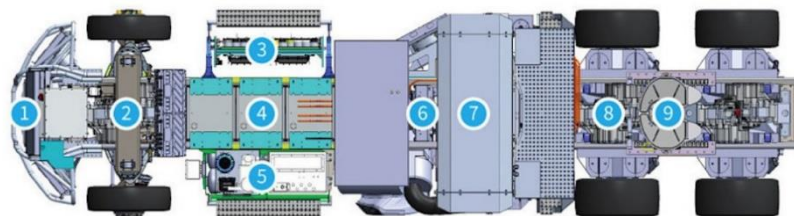


Рис. 51. Nikola One – первісток сімейства з трьох водневих тягачів фірми Nikola.

Компановка: 1 – система охолодження; 2 – два електричних мотор-редуктора для привода передніх коліс; 3 – блок високовольтної та електроніки для керування; 4 – тягова батарея; 5 – ресівер пневматичної гальмівної системи та бак системи охолодження батареї; 6- електрохімічний генератор (паливні елементи на 300 кВт); 7 – баки з воднем; 8 – задній міст з електродвигуном; 9 – сидло.

Друга модель відрізняється в першу чергу кабіною. У Nikola One є спальний відсік, а Nikola Two оснащений лише компактною кабіною для перевезень, але для відпочинку вона не годиться.



Рис. 52. Друга модель Nikola відрізняється в першу чергу кабіною. У Nikola One є спальний відсік, а у Nikola Two його немає.

В кінці листопада 2018 року компанія представили третю модель водневої вантажівки. Якщо перші дві моделі адресовані американському ринку, то безкапотна Nikola Tre буде працювати в Європі.

За інформацією виробника, розгін до 60 миль / год займає не більше 30 секунд, а пробіг на одній заправці воднем становить 1200 миль. Заправка ж займе не більше 15 хвилин.

Нещодавно проєкт Nikola отримав потужну підтримку. Пивоварна компанія Budweiser Anheuser-Busch заявила про бажання придбати 800 водневих вантажівок цієї марки.



Рис. 53. Безкапотний водневий тягач Nikola Tre для європейського ринку.



Рис. 54. Пивоварна компанія Budweiser Anheuser-Busch заявила про бажання придбати 800 водневих вантажівок Nikola.

3. ІНШІ ВИДИ ВОДНЕВИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

Водень знаходить все більшого застосування в автомобільному транспорті, потягах, судноплаванні. Також паливні елементи, що використовують водень застосовують для дронів, що забезпечує більшу дальність польотів у порівнянні зі звичайними.



Рис. 55. Водневі АЗС у Європі (зелені – працюють; червоні – працюють, але виникли тимчасові технічні проблеми; блакитні – споруджуються) / h2.live.

4. ДЕЯКІ ПОДАЛЬШІ ПЛАНИ РОЗВИТКУ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ НОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ В ВОДНЕВІЙ ЕНЕРГЕТИЦІ

До 2028 року планується розширити мережу заправних станцій і побудувати 700 заправок для гібридних вантажівок по всій території США. Також планується, що вартість виробництва кілограма стисненого газоподібного водню буде знижена до \$ 2,5 (цей обсяг еквівалентний 3,7 літрам дизельного палива).

Влада провінції Хебей, яка знаходиться на сході Китаю, затвердили 43 водневих проєктів по виробництву паливних елементів, обладнання та запуску АЗС на суму 8,75 млрд юанів (\$ 1,23 млрд).

Уряд Хебей також заявив, що буде підтримувати сталеплавильний центр Tangshan і Handan для запуску пілотних проєктів по споживанню водню. HBIS Group, другий за величиною виробник сталі в Китаї, в листопаді минулого року підписав Меморандум про взаєморозуміння (MoU) з італійською гірничодобувною сервісною компанією Tenova Group, щоб побудувати перший в світі демонстраційний проєкт з водневої металургії з виробничою потужністю 1,2 млн тонн.

HBIS планує створити в Ханьдань проєкт з виробництва 3 тонн водню з коксового газу і 380 тонн скрапленого природного газу шляхом рясного процесу охолодження в день. А також запустити чотири станції заправки воднем. У Хебеї також планують створити п'ять ліній з виробництва водневих паливних елементів і два проєкти з виробництва автомобілів на водневому паливі.

Через 30 років у більшості регіонів світу водень буде вироблятися за допомогою сонячної й вітрової електроенергії та коштуватиме \$0,8–1,6 за кілограм. Такий прогноз зробила дослідницяка компанія BloombergNEF, про це йдеться у її доповіді «Перспективи водневої економіки» (Hydrogen Economy Outlook).

Названа вартість «зеленого» водню приблизно відповідає нинішнім цінам на природний газ в енергетичному еквіваленті (\$6-12 за млн БТЕ). Вартість може бути ще нижчою у країнах зі значним потенціалом використання поновлюваних джерел енергії.

За даними аналітиків, 72% всіх введених в експлуатацію в 2019 році джерел енергії були поновлюваними. Велика частина цього зростання припала на Азію – 54% приросту потужності відновлюваних джерел енергії. При цьому в Європі та США за цей період закрилося більше електростанцій, що працюють на викопному паливі, ніж відкрилося.

Враховуючи вартість зберігання і транспортної інфраструктури, вартість відновлюваного водню з доставляння у Китай, Індію і Західну Європу може впасти приблизно до \$2/кг (\$15/млн БТЕ) у 2030 році та \$1/кг (\$7,4/млн БТЕ) у 2050 році.

Bloomberg NEF зазначає, що падіння цін дозволить «зеленому» водню забезпечувати до 2050 року 24% світових потреб в енергії й скоротити глобальні викиди від викопного палива у промисловості на третину.

«Необхідна велика політична підтримка і 150 мільярдів доларів субсидій до 2030 року, щоб стимулювати розширення ринку, – зазначають аналітики BloombergNEF. Розширити застосування водню також допоможе введення вуглецевого податку, а також колосальне будівництво об'єктів відновлюваної енергетики».

Так, для сталеливарної промисловості вуглецевий податок повинен скласти \$50 за тону CO_2 , для виробництва цементу – \$60, для хімікатів, у тому числі аміаку, потрібно \$78, а для використання водню у якості палива для суден – 145 доларів.

На додачу, для забезпечення зеленим воднем 24% глобальних потреб в електроенергії необхідно щороку виробляти 60000 ТВт*год сонячно-вітрової електроенергії (без ГЕС). При цьому 31320 ТВт*год електроенергії буде направлятися безпосередньо на живлення електролізерів.

Сьогодні вироблення ВДЕ становить 3000 ТВт*год, а все виробництво електрики на Землі не перевищує 30000 ТВт*год.

«Зберігання водню у великих кількостях буде одним з найбільш серйозних викликів для майбутньої водневої економіки, – зазначають у BloombergNEF. – Кількість недорогих великомасштабних варіантів, таких як соляні каверни, обмежена, а вартість використання альтернативних технологій зберігання часто може перевищувати вартість виробництва самого водню».



Рис. 56. Воднева заправна станція, де використовується й сонячна енергія.

В цілому, за оцінкою BNEF, до 2050 року буде потрібно понад 11 трильйонів доларів США інвестицій для створення інфраструктури, необхідної для забезпечення воднем 24% кінцевого споживання енергії у 2050 році.

На думку фахівців, водень є дуже перспективним енергоносієм, оскільки його кількість в природі практично необмежено. Крім того, оскільки він є компонентом води й більшості органічних сполук, його використання не завдає шкоди навколишньому середовищу. Сонячні, вітрові та гідроенергетичні установки повинні замінити енергію з природних невідновлюваних ресурсів.

Питання для контролю

1. Перелічите переваги використання водню.
2. На які класи можна перелічити водневі автомобілі?
3. Наведіть відомості про паливний елемент?
4. Наведіть відомості про паливний бак зберігання водню.
5. Перелічите можливості виробництва водню.
6. Нагадайте, що таке електроліз?

7. Які розрізняють наявні термохімічних процеси при виробництві водню?
8. Зробіть приклади успішного впровадження водневих технологій в різних країнах.
9. Які існують проблеми з розвитком водневої інфраструктури?
10. Наведіть приклади водневих технологій, що можуть відноситись до стартапів.
11. Які існують передумови для переходу на водневі джерела та технології з урахуванням потенціалу України.
12. Коли з'явився перший водневий автомобіль?
13. Що зробив французький вчений Франсуа Ісаак де Рівас?
14. Ким і коли були відкриті паливні елементи?
15. Пригадайте які перші автомобільні компанії взялись за розробку водневих автомобілів?
16. Що з таке водневий двигун?
17. Який внесок у розвиток водневих автомобілів зробила компанія BMW?
18. Який внесок у розвиток водневих автомобілів зробила компанія Toyota?
19. Перелічіть найбільш відомі автомобільні компанії, що займаються розвитком та впровадженням водневих технологій на автомобільному транспорті?
20. Що Ви знаєте про перший автономний водневий кросовер?
21. Наведіть приклади успішних реалізованих водневих проектів, що стосуються легкових автомобілів?
22. Наведіть приклади успішних реалізованих водневих проектів, що стосуються вантажних автомобілів?
23. Наведіть приклади успішних реалізованих водневих проектів, що стосуються різних видів транспорту.
24. Знайдіть інформацію в інтернеті, що стосується розвитку та впровадження водневих технологій.

ЛІТЕРАТУРА

ЛІТЕРАТУРА, ЩО ВИКОРИСТАНА ПРИ НАПИСАННІ КОНСПЕКТУ ЛЕКЦІЙ

ВСТУП

1. Вікіпедія. Вільна енциклопедія. URL: <https://uk.wikipedia.org>. (дата звернення 15.01.2022).
2. Андрій Білокриницький. Водень – паливо майбутнього. URL: [//itc.ua/articles/articlesvodorod-toplivo-budushhego](https://itc.ua/articles/articlesvodorod-toplivo-budushhego). (дата звернення 15.01.2022).
3. Японія робить ставку на водень. Дата оновлення: 28.01.2020. URL: <https://news.infocar.ua/ya-poniya-rasschityvaet-sdelat-vodorod-ekonomicheski-vygodnoy-alternativoy-sjijennomu-metanu-k-2030-godu-140499.html>. (дата звернення 15.01.2022).
4. Нова Toyota Mirai доступна до покупки. Дата оновлення: 09.01.2020. URL: <https://news.infocar.ua/toyota-nachala-prodaji-vodorodnogo-avtomobilya-mirai-vtorogo-pokoleniya-140140.html>. (дата звернення 15.01.2022).
5. Nissan Leaf офіційно приїде до України. Дата оновлення: 02.01.2020. URL: <https://news.infocar.ua/nissan-leaf-budet-oficialno-priedet-v-ukrainu-140003.html>. (дата звернення 15.01.2022).
6. Проект Дорожньої карти для виробництва та використання водню в Україні. URL: https://unece.org/sites/default/files/2021-03/Hydrogen%20Roadmap%20Draft%20Report_UKR%20March%2021.pdf. (дата звернення 15.01.2022).
7. Natalie Marchant. Grey, blue, green– why are there so many colours of hydrogen? URL: <https://www.weforum.org/agenda/2021/07/clean-energy-green-hydrogen> (дата звернення: 2.04.2022).
8. Sara Giovannini. 50 shades of (grey and blue and green) hydrogen. Дата оновлення: 13.11.2020. URL: <https://energy-cities.eu/50-shades-of-grey-and-blue-and-green-hydrogen> (дата звернення: 2.04.2022).
9. Sylvie Ouziel, Luiz Avelar. The Future of Hydrogen. Technology report – June 2019. URL: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen> (дата звернення: 2.04.2022).

10. Воднений двигун для автомобіля, як позбутися нафтової залежності. Дата оновлення: 23.04.2021. URL: <https://autotopik.ru/obuchenie/1366-vodorodnyy-dvigatel.html> (дата звернення 15.01.2022).
11. technologies that are accelerating the green hydrogen revolution. Дата оновлення: 29.07.2021. URL: <https://www.weforum.org/agenda/2021/06/4-technologies-accelerating-green-hydrogen-revolution> (дата звернення: 2.04.2022).

ТЕМА 1

1. Балицький О. І., Колесніков В. О., Іщенко Б. М. Передумови створення водневої інфраструктури для транспортної галузі. Частина 1. Матеріали VIII-ої міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Проблеми і перспективи розвитку автомобільного транспорту». 14-15 квітня 2020 року: збірник наукових праць. Вінниця: ВНТУ, 2020. С. 23 – 30. ISBN 978-966-641-793-3. URL: <http://atmconf.vntu.edu.ua/materialy2020.pdf>.
2. Балицький О. І., Колесніков В. О., Іщенко Б. М. Передумови створення водневої інфраструктури для транспортної галузі. Частина 2. Матеріали VIII-ої міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Materials of VIII-th international scientific practical internet-conference «Problems and prospects of automobile transport». 14-15 квітня 2020 року: збірник наукових праць. Вінниця: ВНТУ, 2020. С. 31 – 45. ISBN 978-966-641-793-3. URL: <http://atmconf.vntu.edu.ua/materialy2020.pdf>.
3. Паливний елемент. <https://uk.wikipedia.org>. (дата звернення: 12.09.2023).
4. Учені проєктують новий паливний бак для водню. <http://vkurse.ua/ua/technology/toplivnyy-bak-dlya-vodoroda.html>. (дата звернення: 12.09.2023).
5. Toyota Mirai – серійний автомобіль на водороді. URL: <https://www.sciencedebate2008.com/toyota-mirai-hydrogen-fuel-cell-vehicle/> (дата звернення: 12.09.2023).
6. Вадим Єрченко. Mercedes-Benz випустила перший у світі водневий електрокар. URL: <https://tokar.ua/read/29205>. (дата звернення: 12.09.2023).
7. Паливний елемент – основа водневої енергетики Г. Ковтун, Є. Полункін // Вісн. НАН України. 2006. № 3. С. 78-83. URL: <http://dspace.nbu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/2001/08-Kovtyn.pdf?sequence=1>. (дата звернення: 12.09.2023).

8. В Україні збудують установку з виробництва водню. URL: https://biz.censor.net.ua/news/3182194/v_ukraine_postroyat_ustanovku_po_proizvodstvu_vodoroda. (дата звернення: 12.09.2023).
9. Водень та ВДЕ: світові практики застосування. URL: <https://av-enston.com/articles/hydrogen>. (дата звернення: 12.09.2023).
10. У Франції хочуть замінити газ. URL: <https://building-tech.org>.
11. Кулик О. П., Чернишів Л. І. Основні напрямки розвитку водневої енергетики (Огляд). URL: http://www.materials.kiev.ua/hydrogen_2011-2015/obzor1.pdf. (дата звернення: 12.09.2023).
12. Фундаментальні проблеми водневої енергетики. Цільова комплексна програма наукових досліджень. НАН України. URL: <http://www1.nas.gov.ua/programs/hydrogen/RU/Publications/1/Pages/default.aspx>. (дата звернення: 12.09.2023).
13. Водень в енергетиці: навч. посібник / Р. В. Радченко, А. С. Мокрушин, В. В. Тюльпа. URL: <http://elar.urfu.ru/bitstream/10995/30843/1/978-5-7996-1316-7.pdf>. (дата звернення: 12.09.2023).
14. Установки з виробництва технічних газів. Проектування та будівництво. URL: <https://1-engineer.ru/solutions/ustanovki-po-proizvodstvu-tehnicheskikh-gazov>.
15. Соловійов Олег. Одержання водню. URL: <https://metallurgist.pro/poluchenie-vodoroda/> (дата звернення: 12.09.2023).
16. Отримання водню електролізом води: сучасний стан, проблеми та перспективи. С. А. Григор'єв та ін. Транспорт на альтернативному паливі. 2008. № 3. С. 62 – 69. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/poluchenie-vodoroda-elektrolizom-vody-sovremennoe-sostoyanie-problemy-i-perspek/viewer>. (дата звернення: 12.09.2023).
17. Одержання водню з природного газу у плазмі НВЧ-розряду при атмосферному тиску. Газова промисловість № 11 / 777 / 2018 / Енергопостачання та енергозбереження / С. 104 - 113 URL: <http://neftegas.info/upload/iblock/9fa/9fab2afa3f023999b626ffe5a353c4e0.pdf> (дата звернення: 12.09.2023).
18. Вчинено прорив у виробництві водневого палива з води. URL: <https://hightech.plus/2018/10/30/sovershen-proriv-v-proizvodstve-vodorodnogo-topliva-iz-vodi>. (дата звернення: 12.09.2023).
19. Андрій Велесюк. Воднева енергетика – тренд ХХІ століття. URL: http://atomicexpert.com/hydrogen_energy. (дата звернення: 12.09.2023).

20. У Китаї відкрилася перша воднева заправка для автобусів. URL: <https://rim3.ru/avtonovosti/novosti-kompaniy/v-kitae-otkrylas-pervaya-vodorodnaya-zapravka-dlya-avtobusov/>. (дата звернення: 12.09.2023).
21. Спосіб і пристрій отримання водню з анаеробно органічного матеріалу, що розкладається. URL: <https://findpatent.ru/patent/229/2295502.html>. (дата звернення: 12.09.2023).
22. У Бельгії винайшли сонячну панель для обігріву будинків і вироблення водню. URL: <https://building-tech.org/v-belgii-izobrelis-solnechnuju-panel-dlya-obogreva-domov-i-vyrabotki-vodoroda>. (дата звернення: 12.09.2023).
23. Великобританії створено реактор для виробництва зеленого водню. URL: <https://building-tech.org/v-velikobritanii-sozdan-reaktor-dlya-proizvodstva-zelenogo-vodoroda/>. (дата звернення: 12.09.2023).
24. Японці тестують водневий будинок, який використовує CO₂ для штучного фотосинтезу. URL: <https://building-tech.org/japoncy-testirujut-umnyj-dom-kotoryj-ispolzuje-uglekislj-gaz-so2-dlja-iskusstvennogo-fotosinteza/>. (дата звернення: 12.09.2023).
25. Створена сонячна панель, що виробляє електроенергію і водень. URL: <https://building-tech.org/sozdana-solnechnaja-panel-vyrabatyvajushhaja-jelektrichestvo-i-vodorod>.
26. Японія буде водневе суспільство. URL: <https://building-tech.org/japonija-stroit-vodorodnoe-obshhestvo>. (дата звернення: 12.09.2023).
27. Paolo Agnolucci. Hydrogen infrastructure for the transport sector. Volume 32, Issue 15, October 2007, Pages 3526-3544. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319907001164>. (дата звернення: 12.09.2023).
28. Hydrogen transport & distribution. URL: <https://hydrogeneurope.eu/hydrogen-transport-distribution>. (дата звернення: 12.09.2023).
29. Developing hydrogen fueling infrastructure for fuel cell vehicles: A status update. (Briefing October 2017). URL: https://theicct.org/sites/default/files/publications/Hydrogen-infrastructure-status-update_ICCT-briefing_04102017_vF.pdf. (дата звернення: 12.09.2023).
30. Hydrogen Fueling Infrastructure Development. URL: https://afdc.energy.gov/fuels/hydrogen_infrastructure.html/
31. Transport Energy Infrastructure Roadmap to 2050. Hydrogen roadmap. June 2015.

32. Hydrogen in Transport (HIT) URL: <https://rwsenvironment.eu/subjects/sustainable-mobility/international/hydrogen-transport>. (дата звернення: 12.09.2023).
33. 4th International Workshop on Hydrogen Infrastructure and Transportation. URL: https://ec.europa.eu/transport/themes/urban/vehicles/road/hydrogen_en. (дата звернення: 12.09.2023).
34. Julia Alexandrova. Зелений водень H₂Pro «долар за кілограм»: 20-річний стрибок в області чистої енергії? Root-nation.com: веб-сайт. Дата оновлення: 12.03.2021. URL: <https://root-nation.com/ua/news-ua/it-news-ua/ua-zelenij-voden-h2pro> (дата звернення 04.01.2022).
35. Розроблення воденьякумулюючих і воденьгенеруючих матеріалів на основі гідриду магнію та оптимізація роботи систем постачання водню для паливних комірків. URL: http://www.materials.kiev.ua/Hydrogen_2019-2021/12p.html. (дата звернення: 12.09.2023).
36. Пат. 110659 Україна, МПК8 C01B 3/00, C22C 1/04 C22C 23/00. Спосіб підвищення циклічної стабільності композитних воденьякумулюючих матеріалів на основі магнію / Завалій І. Ю.; Денис Р. В.; Березовець В. В.; Рябов О. Б.; Лютий П. Я. (Україна). № 201115332; Опубл. 25.10.2016, Бюл. №20, 4 с.
37. Hydrogen production at Dutch solar park. URL: <https://www.pv-magazine.com/2022/03/28/hydrogen-production-at-dutch-solar-park> (дата публікації: 28.03.2022; дата звернення: 2.04.2022).
38. Lennart van der Burg MSc. 15 things you need to know about hydrogen. URL: <https://www.tno.nl>. (дата звернення: 12.04.2022). 16. Jensen, R.; van der Eijk, C.; Wærnes, A. N. Production of Sustainable Hydrogen and Carbon for the Metallurgical Industry. Mater. Proc. 2021, 5, 67. <https://doi.org/10.3390/materproc2021005067>.
39. Yusaf, T.; Laimon, M.; Alrefae, W.; Kadirgama, K.; Dhahad, H.A.; Ramasamy, D.; Kamarulzaman, M.K.; Yousif, B. Hydrogen Energy Demand Growth Prediction and Assessment (2021–2050) Using a System Thinking and System Dynamics Approach. Appl. Sci. 2022, 12, 781. <https://doi.org/10.3390/app12020781>. (дата звернення: 12.09.2023).
40. Тащев Ю. В. Виділення факторів, що впливають на вартість «зеленого» водню. X Міжнародна науково-практичної конференція «Економіка підприємства: сучасні проблеми теорії та практики». 10 вересня 2021 року. Одеса. URL: https://www.researchgate.net/publication/354722975_VIDILENNA_FAKTORIV_SO_VPLIVAUT_NA_VARTIST_ZELENOGO_VODNU.

41. Які вектори водневої енергетики? Результати аналізу експертів НАДПУ. URL: <http://neiau.org/yaki-vektory-vodnevoyi-energetyky-rezultaty-analizu-ekspertiv-nadpu>. (дата звернення: 12.09.2023).
42. Усі АЕС на карті України. URL: https://www.energoatom.com.ua/ua/npp_on_map. (дата звернення: 12.09.2023).
43. Обґрунтування пошукової технології водневих скупчень і геодинамічних явищ (нафтогазоносні регіони, шахтні поля) // Ігор Багрій; академік НАН України Петро Гожик; академік НАН України Мирослав Павлюк; професор, член-кореспондент НАН України Юрій Забулонов; професор Георгій Рудько; кандидат технічних наук Ігор Мальчевський; президент «Українського Водневої Ради» Олександр Репкін і гірничий інженер Святослав Кузьменко.// Київ : Фоліант. Монографія. 96 с. ISBN: 978-617-7399-21-5. URL: <http://geojournal.igs-nas.org.ua/article/view/169931>. (дата звернення: 12.09.2023).
44. Pokhmurskii V. I., Balitskii A. I. Hydrogen Influence Upon Cracking Resistance and Fracture Character of Austenitic Non-Magnetic Steel.//»Fourth International conference on Hydrogen Effects on Material Behaviour» (Abstracts), Jackson Lake Lodge Moran, Wyoming September 12th-16th, 1989, p.73-74.
45. Pokhmurskii V. I. and Balitskii A. I. Hydrogen Influence upon Cracking Resistance and Fracture Character of Austenitic Non-Magnetic Steel // «Hydrogen Effects on Material Behavior» -Warrendale, Pa (USA): The Mineral, Metals, Materials Soc., 1990.- P.985-990.
46. Balitski A., Krohmalny O., Ripey I. Hydrogen cooling of turbogenerators and the problem of rotor retaining ring materials degradation// International journal of hydrogen energy. 2000. v.25. №2. P.167-171.
47. Balyts'kyi O. I. Effect of hydrogen on structural strength of high - nitrogen chromium-manganese steels // Materials Science. 2000. № 4. P.541-545. www.wkap.nl/journalhome.htm/1068-820x . (дата звернення: 12.09.2023).
48. Balitskii A. I., Vitvitskii V. I. Determination of stainless steels mechanical properties in high-pressure hydrogen // Abstracts of 7th International Conference on «Hydrogen Effect of Material Behaviour», Jackson Lake Lodge, WY, Sept. 7-10, 2008, p.18-19.
49. Balitskii A. I., Panasyuk V. V. Workability Assessment of Structural Steels of Power Plant Units in Hydrogen Environments: Strength of Materials (Springer+Business Media Inc.). 2009, vol. 41, № 1. P. 52-57.

50. Balyts'kyi O. I., Kostyuk I. F. Strength of welded joints of Cr-Mn steels with elevated content of nitrogen in hydrogen-containing media // *Materials Science (Springer)*. 2009, № 1, p. 97-107.
51. Balyts'kyi O. I., Ivaskevich L. M., Mochylskii V. M., Golijan O. M. Influence of hydrogen on the crack resistance of 10 Kh15N27T3B2MP steel // *Materials Science (Springer)*. 2009, № 2. P.258-267.
52. Balitskii A. I., Vitvitskii V. I. Determination of stainless steels mechanical properties in high-pressure hydrogen // *Effects of Hydrogen on Materials*. Edited by Brian Somerday, Petros Sofronis, Russell Jones. Published by ASM International.-Materials Park, Ohio. Printed in the USA. 2009. p.421-428. www.asminternational.org
53. Balitskii O. I. Effercts of hydrogen on materials // *Materials Science (Springer)*. 2009, № 5, p. 131-132.
54. Balyts'kyi O. I., Vytvyts'kyi V. I., Ivaskevich L. M., Mochylskii V. M., Hrebenyuk S.O. High-temperature hydrogen resistance of stainless steels // *Materials Science (Springer)*. 2010, № 2. P.221-233.
55. Балицький О. І. Витвицький В. І., Іваськевич Л. М., Бережницька М. П., Гребенюк С. О., Мочульський В. М. Спосіб визначення водневої деградації сталей у газовому середовищі водню. Патент на корисну модель № 50656 України, МПК G01N 3/08. Заявка № u 2009 10305; Заявлено 12.10.2009. Опубліковано 25.06.2010. Бюл.№ 12.
56. Balitskii A., Vytvytskii V., Ivaskevich L., Elias J. The high- and low-cycle fatigue behaviour of Ni-contain steels and Ni-alloys in high pressure hydrogen / *International Journal of Fatigue*. 2012 vol. 39. P. 32–37. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142112311001411>
57. Ivas'kevych L. M., Balyts'kyi O. I., Mochul's'kyi V. M. Influence of hydrogen on the static crack resistance of refractory steels. *Materials Science*, Vol. 48, № 3, p. 345-353.
58. Балицький О. І., Іваськевич Л. М., Мочульський В. М. Довготривала статична тріщиностійкість сталей та сплавів у газоподібному водні // Тез. доп. Міжнародної науково-технічної конференції «Конструкційна міцність матеріалів та ресурс обладнання АЕС». К.: Ін-т проблем міцності ім. Г.С.Писаренка, с. 29-30. Balitskii O. I., Ivaskevich L. M., Mochul'skiy V. M. The long time crack static growth resistance of steels and alloy in gaseous hydrogen // *Structural Integrity and lifetime of of NPP equipment*. Kyiv, 2012. P. 29-30.
59. Балицький О. Вплив водню за високих температур та тисків на властивості нікелевих сталей і сплавів // *Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій*. Львів: Фізико-механічний інститут ім.Г. В.Карпенка НАН України, 2014. С. 593–598. Balitskii A. Hing Temperature and High Pressure Hydrogen Influence on the Properties of

- Nickel Steels and Alloys // Fracture mechanics of materials and structural integrity. Editor V.V. Panasyuk. Lviv-2014. P. 593-598.
60. Balitskii A. I. Hydrogen influence on high nitrogen steels mechanical properties for nuclear power plants 4-pole generators // Proceedings of the 12th International Conference on High Nitrogen Steels, HNS-2014, 16 - 19 September 2014, Hamburg, Germany. Edited by. Hamburg, Germany. 2014. p.102-105.
 61. Balitskii A., Semerak M., Balitska V., Subota A., Wus O. Hydrogen Degradation of The Pressure Gas Tanks Materials After Long-Term Service // Solid State Phenomena. 2015. Vol. 225. P. 39-44.
 62. Мицик Б. Г., Іваницький Я. Л., Балицький О. І., Кость Я. П. Вплив водню на пружний гістерезис та залишкову деформацію сталі 20 за дії малих механічних напружень // XVI Міжнародна науково-техн. конф. «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», 22-25 червня 2015 р. Одеса, 2015. С. 48-49. Proc. of the XVI International Scientific and Technical Conference «The Progressive Technics, Technology and Engineering Education». Odesa, Ukraine. June 22 –25th 2015. P. 48-49.
 63. Balyts'kyi O. I., Mochylski V. M., Ivaskievich L. M. Evaluation of the influence of hydrogen on mechanical characteristics of complexly alloyed nickel alloys // Materials Science. 2016. V. 51, № 4. P. 538–547. [DOI 10.1007/s11003-016-9873-9](https://doi.org/10.1007/s11003-016-9873-9).
 64. Balyts'kyi O. I., Abramek K. F., Shtoeck T., Osipowicz T. Evaluation of hydrogen containing gasses losses during wear of piston engine // Materials Science. 2017. Vol.53, № 2. P. 156 -159.
 65. Balitskii A. Fatigue crack resistance of modern materials for turbogenerators & gas turbine in high pressure and high temperature hydrogen // Proceedings of the 14th International Conference on Fracture (ICF-14), June 18–23, 2017: Rhodes (Greece). Paper N 15.
 66. Kawiak M., Balitskii A. Hydrogen embrittlement of welded joints of tram rails in aggressive environments // Proceedings of the 14th International Conference on Fracture (ICF-14), June 18–23, 2017: Rhodes (Greece). Paper № 38.
 67. Balitskii A. Materials resistant to extreme temperature and pressure for future hydrogen and steam turbines, modern 2- and 4-pole npp turbogenerators // European Commission funded International Workshop «Materials resistant to extreme conditions for future energy systems» June 12-14, 2017, Kyiv, Ukraine, p.21. <http://dx.doi.org/10.2760/568471>.

68. Balitskii A., Elias J., Balitska V. Low and high cycle fatigue of heat resistant steels and nickel based alloys in hydrogen for gas, steam turbines and generators applications// Programm and Abstracts of the 12th International Fatigue Congress 27 May- 1 June 2018, Poitiers Futuroscope, France. Editor A.F. Blom. EMAS. 2018. P.6.
69. Balitskii A., Elias J., Balitska V. Low and high cycle fatigue of heat resistant steels and nickel based alloys in hydrogen for gas, steam turbines and generators applications // MATEC Web of Conferences 165, 05002 (2018) https://www.matec-conferences.org/articles/matec-conf/pdf/2018/24/matecconf_fatigue2018_05002.pdf
70. Balitskii A. I., Kvasnitska Y. H., Ivaskевич L. M., Mialnitsa H. P.. [Hydrogen and corrosion resistance of Ni-Co superalloys for gas turbine engines blades](#) // Archives of Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 91, Issue 1, P. 5-14. DOI: 10.5604/01.3001.0012.1380.
71. Балицький О. І., Іваськевич Л. М. Оцінювання водневого окрихчення високолегованих хромонікелевих сталей та сплавів у водні за високим тиском і температур. *Проблеми міцності*, 2018, №6 (456), С.151-157.

ТЕМА 2. АВТОМОБІЛЬНИЙ ВОДНЕВИЙ ТРАНСПОРТ

1. Колесніков В. О. Водневі технології. Частина 1. Легкові водневі автомобілі. Матеріали VIII-ої міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Проблеми і перспективи розвитку автомобільного транспорту» (Materials of VIII-th international scientific practical internet-conference «Problems and prospects of automobile transport»). 14-15 квітня 2020 року: збірник наукових праць. / Міністерство освіти і науки України, Вінницький національний технічний університет [та інш.]. Вінниця: ВНТУ, 2020. С. 144 157. ISBN 978-966-641-793- URL: <http://atmconf.vntu.edu.ua/materialy2020.pdf>.
2. Риваз, Франсуа Исаак де. Вікіпедія. Вільна енциклопедія. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%B8%D0%B2%D0%B0%D0%B7.%D0%A4%D1%80%D0%B0%D0%BD%D1%81%D1%83%D0%B0.%D0%98%D1%81%D0%B0%D0%B0%D0%BA.%D0%B4%D0%B5>. (дата звернення: 12.09.2023).
3. Автор: François Isaac de Rivaz 1752 – 1828) - 1804 patent in the Republic of Valais, Суспільне надбання. URL: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=15350628>. (дата звернення: 12.09.2023).

4. Перший двигун внутрішнього згоряння. URL: https://pikabu.ru/story/perviy_dvigatel_vnutrennego_sgoraniya_6177462. (дата звернення: 12.09.2023).
5. The History of the Automobile The Internal Combustion Engine and Early Gas-Powered Cars. URL: <https://www.thoughtco.com/who-invented-the-car-4059932>. (дата звернення: 12.09.2023).
6. GM's Electrovan hydrogen fuel cell vehicle turns 50. URL: <https://www.motor1.com/news/100867/first-hydrogen-fcv-gm>.
7. Борзенко Андрій. Паливні елементи для мобільних пристроїв. URL: <https://www.computer-museum.ru/technlg/fuelcell.htm>.
8. GM Electrovan Concept '1966. URL: https://www.autowp.ru/gm/c_electrovan_concept/pictures/bnt7z3.
9. Автомобілі на водневому паливі: створення, розвиток, перспективи. URL: <https://ev-avto.ru/vodorodnye/avtomobili-na-vodorodnom-toplive-sozdanie-razvitie-perspektivy>. (дата звернення: 12.09.2023).
10. Екологія Американською Проект GM Electrovan. URL: <https://www.drive2.ru/c/915998>. (дата звернення: 12.09.2023).
11. Водневі автомобілі. URL: <http://900igr.net/prezentatsii/khimiya/Vodorod/017-Vodorodnye-avtomobili.html>. (дата звернення: 12.09.2023).
12. First Details on the BMW i Hydrogen NEXT Fuel Cell Vehicle BMW is keeping the faith in fuel cell technology, with an assist from Toyota. URL: <https://www.designnews.com/batteryenergy-storage/first-details-on-bmw-i-hydrogen-next-fuel-cell-vehicle/20529667362735>. (дата звернення: 12.09.2023).
13. BMW 5-Series Gran Turismo стала водородной. URL: <https://www.autocentre.ua/news/novinka/bmw-5-series-gran-turismo-stala-vodorodnoy-48324.html>.
14. Водневий BMW Hydrogen 7 готовий до серійного виробництва. URL: <https://www.autonews.ru/news/5825a3c89a79474743127d57>. (дата звернення: 12.09.2023).
15. BMW Hydrogen 7 автомобіль майбутнього. URL: <https://autopoisk24.net/bmw/bmw-hydrogen-7-avtomobil-budushchego>.
16. Автор: Claus Ableiter власна робота, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3541727>. (дата звернення: 12.09.2023).
17. BMW Hydrogen 7. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/BMW_Hydrogen_7. (дата звернення: 12.09.2023).
18. Toyota Mirai серійний автомобіль на водні. URL: <https://www.sciencedebate2008.com/toyota-mirai-hydrogen-fuel-cell->

- [vehicle](#). (дата звернення: 12.09.2023).
19. Toyota Shows Off Fuel-Cell Automobile. URL: https://www.nytimes.com/2013/11/21/business/international/toyota-unveils-fuel-cell-concept-automobile.html?_r=0. (дата звернення: 12.09.2023).
 20. Toyota Mirai URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Toyota_Mirai.
 21. Автор: Turbo-му-з власна робота, CC BY-SA 4.0. URL: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=38391539>. (дата звернення: 12.09.2023).
 22. Toyota Ushers in the Future with Launch of 'Mirai' Fuel Cell Sedan. URL: <https://global.toyota/en/detail/4198334>.
 23. Toyota Develops Engines with Improved Thermal, Fuel Efficiency. URL: <https://global.toyota/en/detail/mail/1693527>. (дата звернення: 12.09.2023).
 24. У BMW з'явився X5, що працює на водні. URL: <https://motor.ru/news/bmw-x5-i-hydrogen-next-10-09-2019.htm>.
 25. Hydrogen fuel cell cars: everything you need to know. URL: <https://www.bmw.com/en/innovation/how-hydrogen-fuel-cell-cars-work.html>. (дата звернення: 12.09.2023).
 26. Вадим Єрченко. Китай вкладе 17 млрд \$ у створення автомобілів на водні. URL: <https://tokar.ua/read/34700>.
 27. Перший китайський автомобіль на водні Grove отримав запас ходу 1000 км. URL: <https://building-tech.org/pervyj-kitajskij-avtomobil-na-vodorode-grove-poluchil-zapas-hoda-1000-km>. (дата звернення: 12.09.2023).
 28. Grove Hydrogen показала відразу три водневі автомобілі. URL: <https://hightech.plus/2019/04/22/grove-hydrogen-pokazala-srazu-tri-vodorodnih-avtomobilya>. (дата звернення: 12.09.2023).
 29. Водневе майбутнє Китаю. URL: <https://stimul.online/news/vodorodnoe-budushchee-kitaya/>. (дата звернення: 12.09.2023).
 30. Вадим Єрченко. Mercedes-Benz випустила перший у світі водневий електрокар. URL: <https://tokar.ua/read/29205>. (дата звернення: 12.09.2023).
 31. Mercedes-Benz GLC F-CELL: Market launch of the world's first electric vehicle featuring fuel cell and plug-in hybrid technology. URL: <https://media.daimler.com/marsMediaSite/en/instance/ko/Mercedes-Benz-GLC-F-CELL-Market-launch-of-the-worlds-first-electric-vehicle-featuring-fuel-cell-and-plug-in-hybrid-technology.xhtml?oid=41813012>. (дата звернення: 12.09.2023).

32. Renault анонсувала новий електричний Kangoo і водневий Master. Курс України : веб-сайт. URL: https://kurs.com.ua/ua/novost/318177-renault-anonsirovala-novii-alektricheskii-kangoo-i-vodorodnii-master?source=read_another_language_link. (дата звернення: 25.03.2021).
33. Компанія Renault анонсувала новий водневий фургон Renault Master ZE Hydrogen. Car : веб-сайт. URL: <https://car.ru/news/automobili/111980-kompaniya-renault-anonsirovala-noviyi-vodorodnyiy-furgon-renault-master-ze-hydrogen>. (дата звернення: 25.03.2021).
34. Renault Releases Longer Range Kangoo And Large Master Van. hybrid-cars.com: веб-сайт. URL: <https://www.hybridcars.com>. (дата звернення: 07.04.2021).
35. Fueling the Future of Mobility. Ballard Power Systems: веб-сайт. URL: <https://www.ballard.com/>. (дата звернення: 12.09.2023).
36. Hyundai NEXO перший у світі повністю автономний водневий кровер. URL: <https://hyundai.com.ua/node/962/>. (дата звернення: 12.09.2023).
37. Андрій Білокриницький. Водень- паливо майбутнього. [Електронний ресурс]. URL: <https://itc.ua/articles/articlesvodorod-toplivo-budushhego>. (дата звернення: 12.09.2023).
38. Водень газоподібний. Заправні станції ISO/TS 20100:2008 Gaseous hydrogen Fuelling stations. [Електронний ресурс]. URL: (IDT)<http://docs.cntd.ru/document/1200103135>. (дата звернення: 12.09.2023).
39. Водневий двигун для автомобілів, як позбутися нафтової залежності. <https://autotopik.ru/obuchenie/1366-vodorodnyy-dvigatel.html>. (дата звернення: 12.09.2023).
40. Водневі автомобілі: ентузіазм в Азії, сумніви в Німеччині. <https://www.dw.com/uk>. (дата звернення: 12.09.2023).
41. Hydrogen from renewable power: Technology outlook for the energy transition 2018, International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi. [Електронний ресурс] URL: <https://www.irena.org/publications/2018/Sep/Hydrogen-from-renewable-power>. (дата звернення: 12.09.2023).
42. Балицький О.І., Колесніков В.О., Іщенко Б.М. Передумови створення водневої інфраструктури для транспортної галузі. Частина 2. Проблеми і перспективи розвитку автомобільного транспорту: VIII-ма міжн. науково-практичн. конф., 14–15 квітня 2020 р.: матеріали. Вінниця: ВНТУ, 2020. С. 31–45.

ЛІТЕРАТУРА ДО 3 ТА 4 РОЗДІЛІВ

1. Field K. Clean Technica: Hydrogen Fuel Cell & Battery Electric Vehicles — Technology Rundown August 2018 / Kyle Field— URL: <https://www.cleantechnica.com/2018/08/11/hydrogen-fuel-cell-battery-electric-vehicles-technology-rundown/>. (дата звернення: 12.09.2023).
2. Балицький О.І., Колесніков В.О., Іщенко Б.М. Передумови створення водневої інфраструктури для транспортної галузі. Частина 2. Проблеми і перспективи розвитку автомобільного транспорту: VIII-ма міжн. науково-практичн. конф., 14–15 квітня 2020 р.: матеріали. Вінниця: ВНТУ, 2020. С. 31–45.
3. Водневі автомобілі: ентузіазм в Азії, сумніви в Німеччині. URL: <https://www.dw.com/uk>. (дата звернення: 12.09.2023).
4. Hydrogen from renewable power: Technology outlook for the energy transition 2018, International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi. URL: <https://www.irena.org/publications/2018/Sep/Hydrogen-from-renewable-power>. (дата звернення: 12.09.2023).
5. Учені проєктують новий паливний бак для водню. URL: <http://vcourse.ua/ua/technology/toplivnyy-bak-dlya-vodoroda.html>.
6. Водень та ВДЕ: світові практики застосування. URL: <https://avenston.com/articles/hydrogen>. (дата звернення: 12.09.2023).
7. North Port, FL | Home. URL: <https://www.cityofnorthport.com/>.
8. Largest 'green' hydrogen plant in Europe. <https://www.portofrotterdam.com/en/news-and-press-releases/largest-green-hydrogen-plant-in-europe>. (дата звернення: 12.09.2023).
9. Delivering the Decarbonisation of The North West Industrial Sector. URL: <https://northwestcluster.co.uk>. (дата звернення: 12.09.2023).
10. Honda FCV Concept full version URL.:<https://youtu.be/jkgY0hQQ854>.
11. Honda FCV Concept . URL: https://www.netcarshow.com/honda/2014-fcv_concept. (дата звернення: 12.09.2023).
12. Toyota представила прототип водневої вантажівки. <https://news.finance.ua/ru/news/-/399993/toyota-predstavila-prototip-vodorodnogo-gruzovika-foto>. (дата звернення: 12.09.2023).
13. Toyota Truck Concept Zero Emission (Fuel Cell Hydrogen URL.: <https://youtu.be/letd-GRwKwE>. (дата звернення: 12.09.2023).
14. Новий рекорд: світ отримує понад третину всієї електроенергії з відновлюваних джерел. URL: <https://telegraf.com.ua/ekologiya>.
15. Hydrogen Economy' Offers Promising Path to Decarbonization. URL: <https://about.bnef.com/blog/hydrogen-economy-offers-promising-path-to-decarbonization>. (дата звернення: 12.09.2023).

ДОДАТКОВА ЛІТЕРАТУРА

1. Балицький О. І. Сучасні матеріали для потужних турбогенераторів. Львів. Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України. Л., 1999. 284 с.
2. Механіка руйнування і міцність матеріалів: Довід. посіб. / Під заг. ред. В. В. Панасюка. Т. 8: Міцність матеріалів і довговічність елементів конструкцій атомних електростанцій / О. І. Балицький, О. В. Махненко, О. О. Балицький, В. А. Грабовський, Д. М. Завербний, Б. Т. Тимофеев. Під ред. О. І. Балицького. Київ: ВД «Академперіодика», 2005. 534 с.
3. Аптекарь М. Д., Колесников В. А., Балицький А. І. Технологія металів та матеріалознавство. Частина 1. Навч. посіб. К.: Красnodон. ВНУ ім. В. Даля, 2012. 151 с. Номер електронного сертифіката 2845.
4. Коротков В. І., Колесніков В. А., Балицький А. І. Методологія інженерної та винахідницької діяльності: Навч. посіб. К.: Красnodон. ВНУ ім. В. Даля, 2013. 110 с. Номер електронного сертифіката 2917.
5. Коротков В. І., Колесніков В. А., Балицький А. І. Машинобудування: Навчальний посібник. Луганськ: Видавництво СНУ ім. Володимира Даля, 2013. 151с. Номер електронного сертифіката 2918.
6. Гідравліка і гідравлічні машини : навч. посіб. для студ. за напрямом підготовки «Технологічна освіта» і «Професійна освіта» всіх форм навчання О. В. Чесноков, О. В. Калайдо, В. О. Колесніков; держ. закл. «Луган. нац. ун-т імені Тараса Шевченка». Луганськ : Вид-во ДЗ «ЛНУ імені Тараса Шевченка», 2013. 170 с.
7. Колесніков В. О., Калінін О. В., Манченко М. В. Вплив воденьвмісних середовищ на зношування вузлів тертя навантажених механізмів / XXI відкрита науково-технічна конференція молодих науковців і спеціалістів КМН 2009 // Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України. Львів. 2009. С. 254-257.
8. Колесніков В. О., Дев'яткін Ю. С., Дев'яткін Д. С. Комп'ютерне моделювання сплавів з урахуванням впливу водню. XXI відкрита науково-технічна конференція молодих науковців і спеціалістів КМН 2009 // Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України. Львів. 2009. С. 258-261.
9. Балицький О. І., Еліаш Я., Колесніков В. О. Сучасні уявлення про водневе матеріалознавство та водень. *Матеріали VI Міжнародної*

- науково-практичної конференції «Економічні, екологічні та соціальні проблеми вугільних регіонів СНД»*. 19 квітня 2013 р., м. Краснодар. С. 32-38.
10. Балицький О. І., Колесніков В. О., Гребенюк С. О., Еліаш Я. Я., К. Ф. Абрамек. Устаткування для технічної діагностики системи поршень-втулка-циліндр при зношуванні конструкційних сплавів у воденьвмісному газовому середовищі. Патент на корисну модель України 127154 від 25.07.18, МПК (2016.01) G01N 3/56 (2006.01) G01N 15/10 (2006.01). Заявка № у 2017 11856; Чинна від 4.12.2017.4 с. Бюл.№ 14, 25.07.2018. <http://base.uipv.org/searchInvStat/>. - ідентифікатор 2484230718.
 11. Колесніков В. А. Дослідження триботехнічних властивостей високофзотистого марганцевих сталей після наводнення. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. Електронне наукове фахове видання, 2009. № 5.
 12. Балицький О. І., Душар І. Я., Колесніков В. О., Мельніков С. Д. Водневостійка сталь. Патент № 47554 на корисну модель України, МПК C22C 38/50. Заявка № у 2009 08857; Заявлено 25.08.2009. Опубліковано 10.02.2010. Бюл. № 3, 2010. 4 с.
 13. Балицький О. І., Колесніков В. О., Хмель Я. Вплив водню на експлуатаційні властивості сталевих деталей. *Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції «Економічні, екологічні та соціальні проблеми вугільних регіонів СНД»*. 20 травня 2011 р. м. Краснодар. С. 14-16.
 14. Балицький О. І., Колесніков В. О., Еліаш Я. Дослідження руйнування ненаводнених та наводнених сплавів в умовах тертя кочення. *Проблеми тертя та зношування*. № 58. 2012. С. 32-37. DOI: 10.18372/0370-2197.58.3615.
 15. Балицький О. І., Еліаш Я., Колесніков В. О. Сучасні уявлення про водневе матеріалознавство та водень. *Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції «Економічні, екологічні та соціальні проблеми вугільних регіонів СНД»*. 19 квітня 2013 р., м. Краснодар. С. 32-38.
 16. Балицький О.І., Колесніков В.О., Еліаш Я., М.Р. Гаврилук Особливості руйнування наводнених високо азотних марганцевих сталей в умовах тертя кочення. *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. 2014, Том 50. № 4. С. 110-116.
 17. Патент на корисну модель № 108524 Україна, МПК G01N3/56, G 01N15/10. Спосіб визначення форми поверхні частинок після сухого та водневого зношування системою комп'ютерного зору / Балицький О. О., Колесніков В. О., Гаврилук М. Р., Погорелов О. О.,

- Колеснікова Е. Б.; Власник Фізико-механічний інститут. - № у 2015 12575; заявл. 21.12.2015; опубл. 25.07.2016, Бюл. № 14. 11 с.
18. Бувалець М. Ю., Рулевська Т. Ф., Колесніков В. О. Стан впровадження водневих технологій на сучасному транспорті. *Матеріали VI-ї Міжнародної науково-технічної інтернет-конференції «Проблеми та перспективи розвитку автомобільного транспорту»*, 12-13 квітня 2018 р., м. Вінниця. С. 31 - 36.
 19. Рулевська Т. Ф., Єльбакієв Д. Г., Колесніков В. О. Перспективи «водневих» автомобілів. *Матеріали VI-ї Міжнародної науково-технічної інтернет-конференції «Проблеми та перспективи розвитку автомобільного транспорту»*, 12-13 квітня 2018 р., м. Вінниця. С. 168-172.
 20. Балицький О. І., Барна Р. А., Іваськевич Л. М., Колесніков В. О. Трещиностійкість та довговічність нікель-кобальтових сплавів у водні. *Матеріали 6-ї Міжнародної науково-технічної конференції «Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій»*. Львів: КІНПАТРИ ЛТД. 2018. С. 24-26.
 21. Балицький О. І., Колесніков В. О., Іщенко Б. М. Передумови створення водневої інфраструктури для транспортної галузі. Частина 1. Матеріали VIII-ої міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Проблеми і перспективи розвитку автомобільного транспорту» (Materials of VIII-th international scientific practical internet-conference «Problems and prospects of automobile transport»). 14-15 квітня 2020 року: збірник наукових праць. / Міністерство освіти і науки України, Вінницький національний технічний університет [та інш.]. Вінниця: ВНТУ, 2020. С. 23 – 30. ISBN 978-966-641-793-3. URL: <http://atmconf.vntu.edu.ua/materialy2020.pdf>.
 22. Балицький О. І., Колесніков В. О., Іщенко Б. М. Передумови створення водневої інфраструктури для транспортної галузі. Частина 2. Матеріали VIII-ої міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Проблеми і перспективи розвитку автомобільного транспорту» (Materials of VIII-th international scientific practical internet-conference «Problems and prospects of automobile transport»). 14-15 квітня 2020 року: збірник наукових праць. / Міністерство освіти і науки України, Вінницький національний технічний університет [та інш.]. Вінниця: ВНТУ, 2020. С. 31-45. ISBN 978-966-641-793-3. URL: <http://atmconf.vntu.edu.ua/materialy2020.pdf>.
 23. Балицький О. І., Іваськевич Л. М., Колесніков В. О., Ріпєй І. В. Дослідження циклічної трещиностійкості сталі 38ХНЗМФА після наводнювання. *І-ша Всеукраїнська наук.-практ. інтернет-конф.*

- «Сучасна наука: стан, проблеми, перспективи». Матеріали. м. Старобільськ, 14-15 квітня 2020 р. С. 112-114.
24. Іщенко Б. М., Крива Є. М., Фірсов О. І., Колесніков В. О. Приклади впровадження водневих технологій. *І-ша Всеукраїнська наук.-практ. інтернет-конф. «Сучасна наука: стан, проблеми, перспективи»*. Матеріали. м. Старобільськ, 14-15 квітня 2020 р. С. 125-127.
 25. Хмель Ярослав, Балицький Олександр, Колесніков Валерій. Деякі матеріалознавчі підходи щодо оцінювання параметрів продуктів зношування після наводнення. *Сучасна наука та освіта: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції* (м. Старобільськ, 14-15 квітня 2021 року). С. 152-153. ISBN 978-617-95067-7-2.
 26. Балицький О. І., Колесніков В. О., Гаврилюк М. Р. Стан розвитку та впровадження водневих технологій. *Матеріали ІХ-ої міжнародної науково-технічної інтернет-конференції «Проблеми і перспективи розвитку автомобільного транспорту»*, 14-15 квітня 2021 року: збірник наукових праць. Міністерство освіти і науки України, Вінницький національний технічний університет [та інш.]. Вінниця: ВНТУ, 2021. С. 15-19. ISBN 978-966-641-851-0 (PDF).
 27. Риб'янець С. Р., Колесніков В. О. Розвиток та впровадження водневих технологій на автомобільному транспорті. *Матеріали ІХ-ої міжнародної науково-технічної інтернет-конференції «Проблеми і перспективи розвитку автомобільного транспорту»*, 14-15 квітня 2021 року: збірник наукових праць. Міністерство освіти і науки України, Вінницький національний технічний університет [та інш.]. Вінниця: ВНТУ, 2021. С. 223-226. ISBN 978-966-641-851-0 (PDF).
 28. Колесніков В. О. Концепція врахування впливу водню на зміну властивостей та руйнування високоміцних важкооброблюваних сталей та сплавів в умовах тертя ковзання, кочення та за механічної обробки / В. О. Колесніков, О. І. Балицький, М. Р. Гаврилюк, О. О. Ревякіна, Л. М. Іваськевич // The concept of taking into account the impact of hydrogen on changing the properties and destruction of high-strength heavy-treated steel and alloys under conditions of sliding, rolling and mechanically: 15-й Міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові 15-th International Symposium of Ukrainian Mechanical Engineers in Lviv. Proceedings.), (м. Львів, 20-21 травня 2021 р.): матеріали симпозіуму. Львів : КІНПАТPI ЛТД, 2021. С. 6-7.
 29. Balitskii A., Ivaskevich L., Kostyuk I., Kochmanski P., Kolesnikov V., Ostaf V. //Hydrogen embrittlement of welded joints of Cr–Mn

austenitic steels Водневе окрихчення зварних з'єднань Cr–Mn аустенітних сталей. Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів Problems of corrosion and ckrksion protection of materials Physicochemical mechanics of materials. Special issue. № 5, vol.1, 2006. P. 233-235.

30. Колесніков В. А. Дослідження триботехнічних властивостей високоазотистих марганцевих сталей після наводження. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. Електронне наукове фахове видання, 2009. № 5.
31. Колесніков В. А., Балицький А. І., Хмель Я. Особливості морфології продуктів зносу високоазотистих сталей до наводження і після, в умовах сухого тертя. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. Вид-во СХУ ім. В. Даля, 2009. № 6(136). Частина 2. С. 185 - 192.
32. Колесніков В. А. Вплив водних середовищ на експлуатаційну стабільність підприємств харчової та переробної промисловості. *Збірник тез наукових доповідей міжнародної науково-практичної конференції наукової молоді і студентів «Сучасні проблеми розвитку легкої і харчової промисловості»*, 3-4 листопада 2010 року в СХУ ім. В. Даля). - Луганськ: вид-во СХУ ім. В. Даля, 2010. С. 20 - 21.
33. Колесніков В. А. Короткий огляд нових досягнень у галузі водневмісних матеріалів. Сучасні уявлення про атом водню. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. Вид-во СХУ ім. В. Даля, 2011. № 2(156) Частина 2. С. 192 - 199.
34. Колесніков В. А., Балицький А. І. Підвищення водневої стійкості холоднодеформованих високоазотистих сталей як резерв ресурсозбереження матеріалів Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні: Зб. наук. праць. Луганськ: Видавництво СХУ. 2011. С. 81- 87.
35. Курильов В. О., Тупельняк О. Л. Колесніков В. А. Можливості використання водню як палива для автомобілів. *Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції «Економічні, екологічні та соціальні проблеми вугільних регіонів СНД»*. 20 травня 2011 р., м. Краснодар. С. 104 - 107.
36. Коровін Я. В., Савченко Е. О., Колесніков В. А. Вплив водню на експлуатаційні властивості деталей з металічних сплавів. *Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції «Економічні, екологічні та соціальні проблеми вугільних регіонів СНД»*. 20 травня 2011 р., м. Краснодар. С. 108 - 111.

37. Колесніков В. А. Дослідження триботехнічних властивостей високоазотистих марганцевих сталей після наводження // Тези Всеукраїнської конференції молодих вчених «Сучасне матеріалознавство: матеріали та технології» (СММТ-2008). Київ. 2008. С. 73.
38. Колесніков В. А., Калінін. А. В. Водневий фактор зносу у вузлах тертя автомобілів. *Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції «Економічні, екологічні та соціальні проблеми вугільних регіонів СНД*. 12-13 травня 2009 р. Краснодар, 2009. С. 111 – 115.
39. Колесніков В. А., Калінін А. В., Балицький А. І., Хмель Я. Необхідність урахування впливу водню на зносостійкість матеріалів у гальмівних парах тертя автомобілів. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2009. № 11(141). Частина 1. С. 62 – 66.
40. Колесніков В. А. Дослідження триботехнічних властивостей високоазотистих марганцевих сталей після наводження. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. Електронне наукове фахове видання, 2009. № 5.
41. Колесніков В. А., Балицький А. І., Хмель Я. Особливості морфології продуктів зносу високоазотистих сталей до наводорожування і після, в умовах сухого тертя. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2009. № 6(136). Частина 2. С. 185 - 192.
42. Кравцов О. В., Колесніков В. О. Сучасні стан і тенденції розвитку автомобільного транспорту. *Нові матеріали і перспективні технології, охорона праці і професійна освіта Матеріали Всеукраїнської науково-практичної Інтернет-конференції з міжнародною участю*. 4 квітня 2014 року, м. Луганськ. С. 77-78.
43. Бердус А. Ю., Колесніков В. О. Удосконалення і модернізація систем автоматизації СТО. *Нові матеріали і перспективні технології, охорона праці і професійна освіта Матеріали Всеукраїнської науково-практичної Інтернет-конференції з міжнародною участю*. 4 квітня 2014 року, м. Луганськ. С. 76-77.
44. Татарінов В. Р., Бердус А. Ю., Кравцов О. В., Колесніков В. О. Сучасні матеріали для автомобілебудування. *Матеріали регіональної науково-практичної конференції професійна освіта на луганинці: теорія та практика*. 15–17 квітня 2014 року. м. Луганськ. С. 218-223.
45. Кравцов О. В., Колесніков В. О. Сучасні стан і тенденція розвитку автомобільного транспорту. *Матеріали регіональної науково-*

- практичної конференції професійна освіта на луганинці: теорія та практика*. 15–17 квітня 2014 року. м. Луганськ. С. 167-175.
46. Бердус А. Ю., Колесніков В. О., Удосконалення і модернізація систем автоматизації СТО та АТП. *Матеріали регіональної науково-практичної конференції професійна освіта на Луганщині: теорія та практика*. 15–17 квітня 2014 року. м. Луганськ. С. 140-146.
 47. Кравцов О. В., Колесніков В. О. Сучасні стан і тенденція розвитку автомобільного транспорту. *Матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції «Економічні, екологічні та соціальні проблеми вугільних регіонів Європи та СНД»*. 26 травня 2014 р. С. 92-100.
 48. Balitskii A. I., Kolesnikov V. O., Elias J., Hawriljuk M. R. Fracture of hydrogenated high nitrogen mangan steels at slide wear // *Materials Science*. 2014. N 4. P. 110-116.
 49. Balyts'kyi O. I., Kolesnikov V. O., Elias J., Havrylyuk M. R. Specific Features of the Fracture of Hydrogenated High-Nitrogen Manganese Steels Under Conditions of Rolling Friction // *Materials Science*. 2015. 50, No 4. P. 604–611.
 50. Balitskii A., Kolesnikov V. Hydrogen Effects on the Formation of Nickel Based Superalloys Cutting and Wear Products / Abstracts of the 22nd European Conference on Fracture ECF22, 26-31 August, 2018, Belgrade, Serbia. P. 182.
 51. O. A. Balitskii, V. O. Kolesnikov, A. I. Balitskii. Wear resistance of hydrogenated high nitrogen steel at dry and solid state lubricants assistant friction // August 2019 Archives of Materials Science and Engineering 2(98):57-67. DOI: 10.5604/01.3001.0013.4607 <https://archivesmse.org/resources/html/article/details?id=193096>.
 52. O. A. Balitskii, V. O. Kolesnikov, A. I. Balitskii, J. J. Elias, M. R. Havrylyuk, Hydrogen effect on the high-nickel surface steel properties during machining and wear with lubricants, Archives of Materials Science and Engineering 104/2 (2020) 49-57. DOI: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.4894>.
 53. Ярченко Б. В., Стадник Л. Д., Колесніков В. О. Нові технології в сучасних автомобілях. *Матеріали VI-ї Міжнародної науково-технічної інтернет-конференції «Проблеми та перспективи розвитку автомобільного транспорту»*. 12-13 квітня 2018 р., м. Вінниця. С. 216 - 223.
 54. Balicki A., Kubicki J., Kolesnikow W. Podwyższanie odpornosci na zuzycie scierne stopow Fe-Mn poprzez wprowadzenie wybranych dodatkow stopowych // *Inzynieria materialowa*. 2003. № 4. s. 244-247.

<http://baztech.icm.edu.pl/baztech/cgi-bin/btgetdoc.cgi?BOS3-0006-0046>.

55. Balytskyi O. I., Kolesnikov V. O., Kubicki J. Enhancement of the crack resistance of manganese cast irons // *Materials Science*. Vol.41, № 1.-2005. p. 67 –73.
56. Balyts'kyi O. I., Kolesnikov V. O., Havrylyuk M. R. Influence of Lubricating Liquid on the Formation of the Products of Cutting of 38KhN3MFA Steel // *Materials Science*. 2019. Vol. 54. N 5. P. 722 – 727. Translated from *Fyzyko-Khimichna Mekhanika Materialiv*, Vol. 54, No. 5, pp. 103–107, September–October, 2018.
57. Василенко О. Є., Безруков В. О., Шуліка С. О., Знова О. І., Іщенко Б. М., Колесніков В. О. Нові технологічні тенденції в автомобільному транспорті. *Матеріали VII-ї Міжнародної науково-технічної інтернет-конференції «Проблеми та перспективи розвитку автомобільного транспорту»*, 8 - 10 квітня 2019 р., м. Вінниця. С. 13 – 24.
58. Ставицький О. В., Стадник Л. Г., Колесніков В. О. Концепція автомобіля майбутнього. *Матеріали VI-ї Міжнародної науково-технічної інтернет-конференції «Проблеми та перспективи розвитку автомобільного транспорту»*, 12-13 квітня 2018 р., м. Вінниця. С. 181 - 189.
59. Балицький О. І., Еліаш Я., Колесніков В. О., Іваськевич Л. М., Мочульський В. М., Гребенюк С. О., Глюзицький О. О. Дослідження матеріалів для розробки гібридних автомобілів. *Матеріали IV-ї Міжнародної науково-технічної інтернет-конференції «Проблеми та перспективи розвитку автомобільного транспорту»*, 14-15 квітня 2016 р., м. Вінниця. С. 28-38. URL: <http://atmconf.vntu.edu.ua/materialy2016.pdf>.
60. Прохорова Т. В., Перчемлі І. Ф., Колесніков В. О. Матеріали та технології в автомобільній промисловості. *Матеріали V-ї Міжнародної науково-технічної інтернет-конференції «Проблеми та перспективи розвитку автомобільного транспорту»*, 13-14 квітня 2017 р., м. Вінниця. С. 105 -112.
61. Колесніков В. О. Водневі технології. Частина 1. Легкові водневі автомобілі. *Матеріали VIII-ої міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Проблеми і перспективи розвитку автомобільного транспорту»*. 14-15 квітня 2020 року: збірник наукових праць. Міністерство освіти і науки України, Вінницький національний технічний університет [та інш.]. Вінниця: ВНТУ, 2020. С. 144 – 157. ISBN 978-966-641-793-3.

62. Колесніков В. О. Водневі технології. Частина 2. Вантажні водневі автомобілі. *Матеріали VIII-ої міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Проблеми і перспективи розвитку автомобільного транспорту»*. 14-15 квітня 2020 року: збірник наукових праць. Міністерство освіти і науки України, Вінницький національний технічний університет [та інш.]. Вінниця: ВНТУ, 2020. С. 158 – 165. ISBN 978-966-641-793-3. URL: <http://atmconf.vntu.edu.ua/materialy2020.pdf>.
63. Балицький О. І., Іваськевич Л. М., Колесніков В. О., Ріпей І. В. Дослідження циклічної тріщиностійкості сталі 38ХНЗМФА після наводнювання. *I-ша Всеукраїнська наук.-практ. інтернет-конф. «Сучасна наука: стан, проблеми, перспективи»*. Матеріали. м. Старобільськ, 14-15 квітня 2020 р. С. 112 – 114.
64. Іщенко Б. М., Крива Є. М., Фірсов О. І., Колесніков В. О. Приклади впровадження водневих технологій. *I-ша Всеукраїнська наук.-практ. інтернет-конф. «Сучасна наука: стан, проблеми, перспективи»*. Матеріали. м. Старобільськ, 14-15 квітня 2020 р. С. 125 – 127.
65. Лященко С. О., Колієв М. В., Серов І. І., Колесніков В. О. Застосування в автомобілебудуванні та енергомашинобудуванні матеріалів з підвищеною корозійною стійкістю. *I-ша Всеукраїнська наук.-практ. інтернет-конф. «Сучасна наука: стан, проблеми, перспективи»*. Матеріали. м. Старобільськ, 14-15 квітня 2020 р. С. 131 – 133.
66. Balitskii A. I., Kostyuk I., Kolesnikow V., Kubicki J., Medvid A. G., Ostaf V. Yu. Hydrogen induced changes of physical and mechanical properties of materials for power generation and transport equipment // Hydrogen Treatment of Materials (Proceedings of the Fourth International Conference 'HTM-2004», Donetsk-Svyatogorsk, May 17–21, 2004). Council of Interparliamentary Assembly of States-Participants of Concord of Independent States. Donetsk. 2004. P. 508–512.
67. Balitskii A., Kolesnikov V., Chmiel J. The influence of microstructure and hydrogen – containing environments on the intensity of cast iron and steel damage by sliding friction. Part 1. Construction of a generalized model of surface layer friction of graphitized steel and cast-iron objects // *Problemy eksploatacji*. 4 (67)/2007.-s.17-29.
68. Balitskii A., Kolesnikov V., Chmiel J. The influence of microstructure and hydrogen containing environments on the intensity of cast iron and steel damage by sliding friction. Part 2. The generalized scheme of the

- steels and grey-iron behaviour during sliding friction // *Problemy eksploatacji*. - 3 (70)/2008.-s.91-102.
69. Шуліка С. О., Серіков О. Р., Колесніков В. О. (Наук. кер.) Гібридні автомобілі. *Матеріали I всеукраїнської наукової інтернет-конференції студентів та молодих вчених*. 16 квітня 2020 рік, м. Старобільськ, Україна. С. 100 – 103.
 70. Шуліка С. О., Серіков О. Р., Колесніков В. О. (Наук. кер.) Застосування нових технологій в гібридних автомобілях Toyota Prius. *Науковий пошук молодих дослідників*. Серія «Технічні науки». ДЗ «ЛНУ ім. Тараса Шевченка», 2020 № 4. м. Старобільськ. С. 79 - 87.
 71. Kolesnikov V. Research of influence of lubricants on working and operating properties of corrosion-steel steels. // XV International Conference «Problems of Corrosion and Corrosion Protection of Materials» (Corrosion-2020). October 15-16, 2020, Lviv, Ukraine: Book of Abstract / Karpenko Physico-Mechanical Institute of NAS of Ukraine; S. Korniy, M.-O. Danyliak, Yu. Maksishko (Eds.). Lviv, 2020. P. 114.
 72. O. A. Balitskii, V. O. Kolesnikov, A. I. Balitskii, J. J. Elias, M. R. Havrylyuk, Hydrogen effect on the high-nickel surface steel properties during machining and wear with lubricants, *Archives of Materials Science and Engineering* 104/2 (2020) 49-57. DOI: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.4894>.
 73. К. Абрамек, Я. Еліаш, А. І. Балицький, В. А. Колесніков. Інноваційні дослідження у обчислювальному матеріалознавстві // 2nd International scientific-practical conference «Entrepreneurship and trade: theoretical approaches and practical aspects of development», November 26-27, 2020, in Starobilsk, Ukraine. (Підприємництво, торгівля: теоретичні підходи та практичні аспекти розвитку. Матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції (м. Старобільськ, 26–27 листопада 2020 року)). С. 218 - 219. ISBN 978-617-7879-49-6.
 74. Я. Хмель, А. І. Балицький, В. А. Колесніков, Е. Б. Колеснікова. Інновації у прикладному матеріалознавстві // 2nd International scientific-practical conference «Entrepreneurship and trade: theoretical approaches and practical aspects of development», November 26-27, 2020, in Starobilsk, Ukraine. Підприємництво, торгівля: теоретичні підходи та практичні аспекти розвитку. Матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції (м. Старобільськ, 26–27 листопада 2020 року) С. 254 - 256. ISBN 978-617-7879-49-6.

75. Сльбакієв Дмитро, Мілютін Євгеній, Колесніков Валерій. Система мульти-зарядки на 800 в та 400 в для електромобілів. «Сучасна наука та освіта». *Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції*. м. Старобільськ, 14-15 квітня 2021 р. С. 131 – 133. ISBN 978-617-95067-7-2.
76. Хмель Ярослав, Балицький О. І., Колесніков В. О. Деякі матеріалознавчі підходи щодо оцінювання параметрів продуктів зношування після наводнення. *Сучасна наука та освіта: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції* (м. Старобільськ, 14-15 квітня 2021 року). С. 152 – 153. ISBN 978-617-95067-7-2.
77. Балицький О. І., Колесніков В. О., Гаврилюк М. Р. Стан розвитку та впровадження водневих технологій *Проблеми та перспективи розвитку автомобільного транспорту. IX-а Міжнар. наук.-техн. інтернет-конф.* Матеріали. 14-15 квітня 2021 р., м. Вінниця, 2021. С. 15 – 19. ISBN 978-966-641-851-0 (PDF).
78. Сльбакієв Д. Г., Мілютін Є. В., Колесніков В. О. Системи мульти-зарядки для електромобілів. *Проблеми та перспективи розвитку автомобільного транспорту. IX-а Міжнар. наук.-техн. інтернет-конф.* Матеріали. 14-15 квітня 2021 р., м. Вінниця, 2021. С. 88 – 92. ISBN 978-966-641-851-0 (PDF).
79. Мілютін Є. В., Пронін О. С., Колесніков В. О. Електрична платформа для майбутніх електромобілів брендів Hyundai, Kia, Genesis та Ionic. *Проблеми та перспективи розвитку автомобільного транспорту. IX-а Міжнар. наук.-техн. інтернет-конф.* Матеріали. 14-15 квітня 2021 р., м. Вінниця, 2021. С. 185 – 189. ISBN 978-966-641-851-0 (PDF).
80. Риб'янець С. Р., Колесніков В. О. Розвиток та впровадження водневих технологій на автомобільному транспорті. *Матеріали IX-ої міжнародної науково-технічної інтернет конференції «Проблеми і перспективи розвитку автомобільного транспорту»*, 14-15 квітня 2021 року: збірник наукових праць / Міністерство освіти і науки України, Вінницький національний технічний університет [та інш.]. Вінниця: ВНТУ, 2021. С. 223 – 226. ISBN 978-966-641-851-0 (PDF).
81. Концепція враховування структурно-фазового стану експлуатованих матеріалів в енергомашинобудуванні при проведенні ремонтів з застосуванням механічної обробки. Колесніков В. О., Балицький О. І., Гаврилюк М. Р., Ревякіна О. О. II-га Міжнародна науково-технічна конференція «Перспективи розвитку машинобудування та транспорту 2021»: Збірник тез [Електронний ресурс]. Вінниця: ВНТУ. 2021. с. 310 -312.

82. Колесніков В. О. Концепція врахування впливу водню на зміну властивостей та руйнування високоміцних важкооброблених сталей та сплавів в умовах тертя ковзання, кочення та за механічної обробки / В. О.Колесніков, О. І. Балицький, М. Р. Гаврилюк, О. О. Ревякіна, Л. М. Іваськевич // The concept of taking into account the impact of hydrogen on changing the properties and destruction of high-strength heavy-treated steel and alloys under conditions of sliding, rolling and mechanically: 15-й Міжнародний симпозиум українських інженерів-механіків у Львові 15-th International Symposium of Ukrainian Mechanical Engineers in Lviv. Proceedings.), (м. Львів, 20 – 21 травня 2021 р.): матеріали симпозиуму. Львів : КІНПАТPI ЛТД, 2021. С. 6 – 7.
83. Wear Resistance of Spark Ignition Engine Piston Rings in Hydrogen-Containing Environments // Myroslav Kindrachuk, Dmytro Volchenko, Alexander Balitskii, Karol F. Abramek, Mykola Volchenko, Olexiy Balitskii, Vasyl Skrypyuk, Dmytro Zhuravlev, Alina Yurchuk and Valerii Kolesnikov // Energies 2021, 14(16), 4801. (Scopus, Web of Science). <https://doi.org/10.3390/en14164801>.
84. Водневий вектор розвитку автомобільного транспорту // О. І. Балицький, В. О. Колесніков, О. О. Ревякіна, К. Ф. Абрамек, Л. М. Іваськевич, М. Р. Гаврилюк, Є. Б. Колеснікова. *XIV Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту»*, Присвячено дню працівників автомобільного транспорту і дорожнього господарства, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 25-27 жовтня 2021 року. С. 22 – 25.
85. Balitskii A, Kolesnikov V, Abramek K. F, Balitskii O, Eliaz J, Havrylyuk M, Ivaskevych L, Kolesnikova I. Influence of Hydrogen-Containing Fuels and Environmentally Friendly Lubricating Coolant on Nitrogen Steels' Wear Resistance for Spark Ignition Engine Pistons and Rings Kit Gasket Set. Energies. 2021; 14(22):7583. <https://doi.org/10.3390/en14227583>.
86. Balitskii, A.; Kindrachuk, M.; Volchenko, D.; Abramek, K. F.; Balitskii, O.; Skrypyuk, V.; Zhuravlev, D.; Bekish, I.; Ostashuk, M.; Kolesnikov, V. Hydrogen Containing Nanofluids in the Spark Engine's Cylinder Head Cooling System. Energies 2022, 15, 59. <https://doi.org/10.3390/en15010059>.
87. Вплив особливостей навантаження та наводнювання та триботехнічні властивості сталей. / Балицький О. І., Колесніков В. О., Іваськевич Л. М., Гаврилюк М. Р. Фізико-хімічна механіка матеріалів. № 4, т. 58. 2022. С. 73–80.

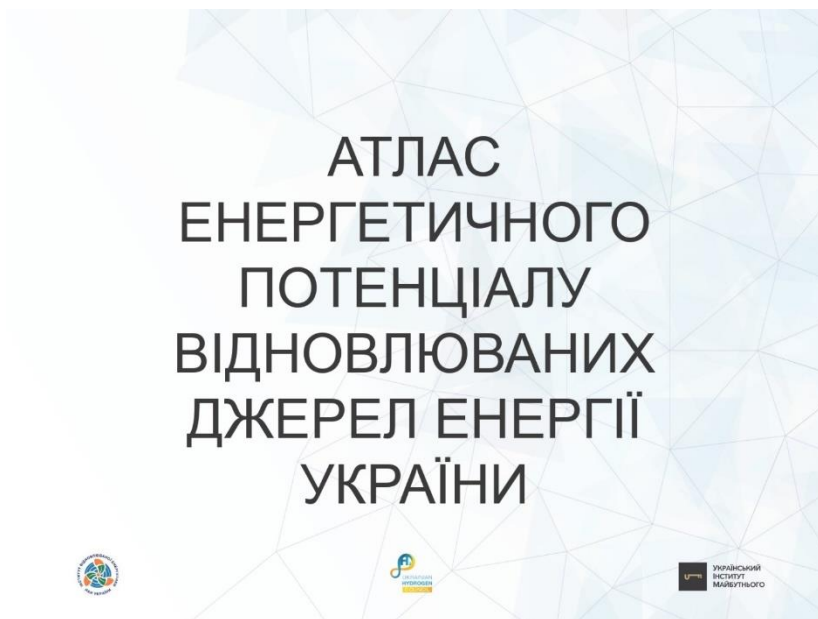
88. Колесніков Валерій Олександрович. Перспективи використання зеленого водню для різних технічних галузей. *Актуальні питання, проблеми та перспективи розвитку науки та освіти: матеріали I Всеукраїнської міждисциплінарної науково-практичної конференції* (м. Полтава, 27-28 квітня 2022 року). Полтава: Вид-во ДЗ «Луганський національний університет імені Тараса Шевченка»: Полтава, 2022. С. 211 – 215.
89. Колесніков В. О. Роль зеленого водню для транспортної галузі // *Матеріали X-ої міжнародної науково-технічної інтернет-конференції «Проблеми і перспективи розвитку автомобільного транспорту»*, 14-15 квітня 2022 року: збірник наукових праць [Електронний ресурс] / Міністерство освіти і науки України, Вінницький національний технічний університет [та інш.]. Вінниця: ВНТУ, 2022. ISBN 978-966-641-910-4. С. 127 – 131.
90. Balitskii, A. I.; Havrilyuk, M. R.; Balitska, V. O.; Kolesnikov, V. O.; Ivaskevych, L. M. Increasing Turbine Hall Safety by Using Fire-Resistant, Hydrogen-Containing Lubricant Cooling Liquid for Rotor Steel Mechanical Treatment. *Energies* 2023, 16, 535. <https://doi.org/10.3390/en16010535>.
91. Верещун А. В., Ануфрієв В. А., Колесніков В. О. Висвітлення деяких недоліків та переваг гібридних та водневих автомобілів. *Проблеми і перспективи розвитку автомобільного транспорту: XI-та міжн. науково-практичн. конф.*, 13–14 квітня 2023 р.: матеріали. Вінниця: ВНТУ, 2023. С. 71–74. ISBN 978-966-641-929-6.
92. Колесніков Валерій. Значення зеленого водню для енергетичної та транспортних галузей. *Сучасна наука та освіта: стан, проблеми, перспективи: III Міжн. науково-практичн. конф.*, 20-21 березня 2023 року: матеріали. Полтава: ДЗ «ЛНУ імені Тараса Шевченка», 2023. С. 407-408. ISBN 978-617-8016-78-4. <https://doi.org/10.12958/978-617-8016-78-4-2023>.
93. Ануфрієв Владислав, Верещун Андрій (Колесніков Валерій Олександрович – наук. кер.). Стилий опис деяких технологічних впроваджень для гібридних та водневих автомобілів. *Науковий пошук молодих дослідників: Збірник наукових праць здобувачів вищої освіти, № 4 (2023)*. м. Полтава: Вид-во ДЗ «Луганський національний університет імені Тараса Шевченка»: Полтава, 2023. С. 48 – 55.
94. Balitskii, O. I., Kolesnikov, V. O., Ivaskevych, L. M. et al. The Influence of Specific Features of Load and Hydrogen Charging on Steel Tribotechnical Properties. *Mater Sci* 58, 505–512 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11003-023-00691-5>.

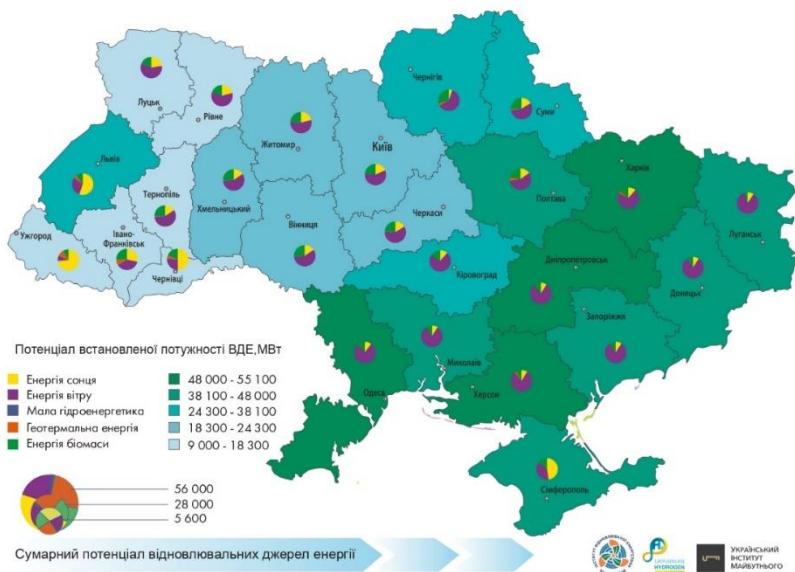
95. Ташеев Ю. В. Прогнозування вартості сонячних електростанцій на основі S-кривої розвитку технологій та математичної моделі витрат Райта. Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті: матеріали XIX Міжнар. наук.- практ. конф., 26-28 вересня 2018 р. Київ : НАНУ. С.60–64.
96. Застосування водневих технологій для забезпечення європейських стандартів експлуатації автотранспорту // Козик Василь Васильович, Мрихіна Олександра Борисівна, Данилович Тарас Богданович, Стеців Ірина Семенівна, Гавриляк Анатолій Степанович, Мельник Володимир Мирославович. International Scientific Journal «Inter-nauka». Series: «Economic Sciences» <https://doi.org/10.25313/2520-2294-2021-11> <https://www.inter-nauka.com/uploads/public/16375967331424.pdf>.
97. Козик В. В., Мрихіна О. Б., Жураковська М. Б. Центри трансферу технологій: еволюція моделей, світовий досвід, шляхи розвитку в Україні. Київ: Кондор. 2021. 128 с.
98. Національна академія наук: Водневі програми та проекти в світі. URL: <https://web.archive.org/web/20080502182456/http://www.hydrogen.nas.gov.ua/Pages/default.aspx>.
99. Ташеев Ю. В., Войтко С. В., Трофименко О. О., Рєпкін О. О., Кудря Т. С. Глобальні тенденції розвитку водневих технологій у промисловості. *Бізнес Інформ*, 2020. № 8. С. 103-114. DOI: <https://doi.org/10.32983/2222-4459-2020-8-103-114>.
100. Chorna N. Prospects for Application of Hydrogen Technologies for Autonomous Power Complexes Based on Renewable Energy Sources // Scientific and Applied Journal Vidnovluvana Energetika. 2021. № 3(66). URL: <https://ve.org.ua/index.php/journal/article/view/306>.
101. Cantarero M. M. V. Of Renewable Energy, Energy Democracy, and Sustainable Development: a Roadmap to Accelerate the Energy Transition in Developing Countries // Energy Research & Social Science, 2020. Volume 70. 101716. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214629620302917>.
102. Відновлювані джерела енергії / За заг. ред. С. О. Кудрі. Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2020. 392 с. ISBN 978-966-999-077-
- Фотографія на обкладинці:* Hydrogen cars vs electric cars
What's the difference and which is better? 22 July, 2021 By: Byron Mathioudakis. URL: <https://rac.com.au/car-motoring/info/hydrogen-vs-electric-cars>. та Toyota Hydrogen Fuel Cell URL: <https://www.toyota.co.uk/hydrogen>.

ДОДАТОК А

«Атлас енергетичного потенціалу відновлювальних джерел енергії України». Скорочений варіант.

[<https://drive.google.com/file/d/11Ay1otLjiqIQelPKxSsqfir2rYwGIKxSg/view>]

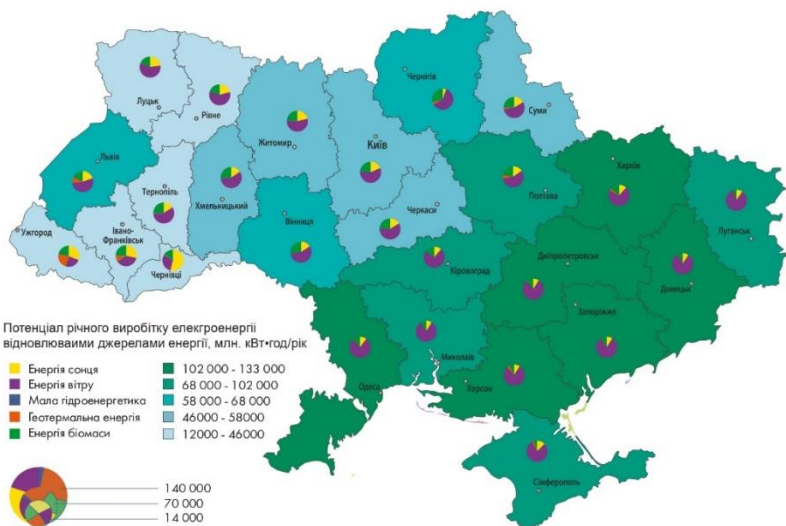




Потенціал встановленої потужності ВДЕ, МВт

Область	Енергія сонця	Енергія вітру	МГЕС	Геотермальна енергія	Енергія Біомаси	Всього
Автономна Республіка Крим	3 603	22 128	1	840	1 273	27 844
Вінницька область	3 646	13 393	24	40	6 192	23 295
Волинська область	2 770	7 184	1	40	2 239	12 234
Дніпропетровська область	4 388	38 978	2	120	5 128	48 616
Донецька область	3 646	32 387	5	200	2 835	39 072
Житомирська область	4 102	10 640	8	50	4 575	19 374
Закарпатська область	1 757	1 163	132	1 400	1 209	5 661
Запорізька область	3 737	33 196	0	40	3 646	40 620
Івано-Франківська область	1 911	2 416	59	600	1 671	6 658
Київська область	3 868	11 983	3	40	4 961	20 855
Кіровоградська область	3 381	21 226	15	40	4 482	29 144
Луганська область	3 669	32 591	2	80	2 042	38 384
Львівська область	3 002	8 015	46	1 400	2 672	15 135
Миколаївська область	3 382	30 043	3	80	3 435	36 943
Одеська область	4 580	34 719	1	240	4 912	44 453
Полтавська область	3 953	14 522	6	1 400	5 662	25 544
Рівненська область	2 756	7 745	3	40	2 584	13 139
Сумська область	3 277	11 096	2	560	5 009	19 945
Тернопільська область	1 901	6 983	12	80	3 019	11 995
Харківська область	4 320	27 119	10	1 300	5 160	37 908
Херсонська область	3 913	34 761	1	1 500	3 360	43 335
Хмельницька область	2 839	10 429	8	40	4 668	17 984
Черкаська область	2 874	10 558	8	40	4 150	17 630
Чернівецька область	4 381	2 414	24	40	1 252	8 111
Чернігівська область	1 113	12 311	1	800	5 932	20 157
Територіальні води та внутрішні водойми		250 000				
Всього	82 769	688 000	376	10 810	92 078	874 033





Сумарний потенціал відновлювальних джерел енергії



Потенціал встановленої потужності ВДЕ, МВт

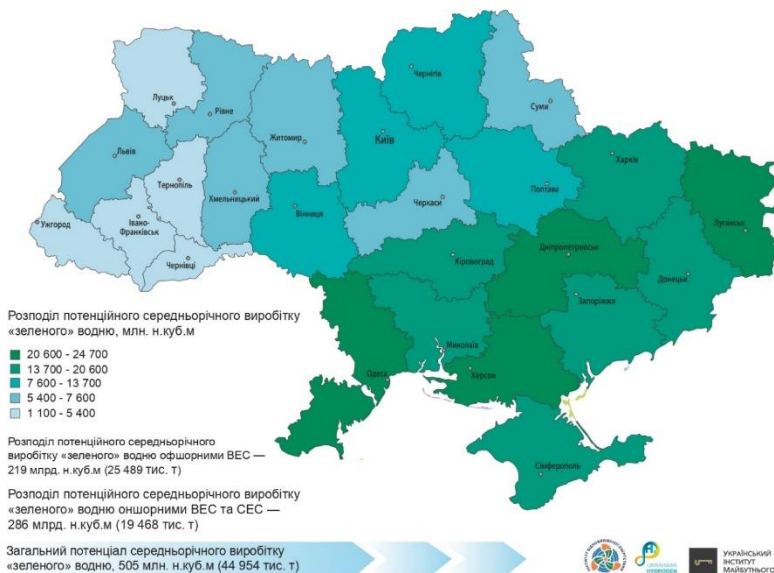
Область	Енергія сонця	Енергія вітру	МГЕС	Геотермальна енергія	Енергія біомаси	Всього
Автономна Республіка Крим	4 323	60 090	3	6 255	5 236	75 907
Вінницька область	4375	36 371	83	298	25 327	66 453
Волинська область	3 324	19 510	4	298	8 310	31 446
Дніпропетровська область	5 266	105 849	7	894	20 646	132 662
Донецька область	4 375	87 949	16	1 489	11 673	105 502
Житомирська область	4 922	28 893	27	372	16 619	50 834
Закарпатська область	2 108	3 157	439	10 424	4 180	20 308
Запорізька область	4 485	90 148	1	298	14 089	109 020
Івано-Франківська область	2 294	6 562	196	4 488	6 415	19 935
Київська область	4 642	32 540	11	298	20 116	57 606
Кіровоградська область	4 057	57 641	53	298	17 724	79 773
Луганська область	4 403	88 503	7	596	8 032	101 540
Львівська область	3 602	21 766	153	10 424	10 428	46 373
Миколаївська область	4 059	81 584	11	596	13 448	99 697
Одеська область	5 496	94 283	5	1 787	19 693	121 264
Полтавська область	4 743	39 437	22	10 424	22 425	77 051
Рівненська область	3 308	21 033	10	298	9 396	34 045
Сумська область	3 933	30 133	8	4 170	19 445	57 689
Тернопільська область	2 281	18 963	42	596	12 301	34 182
Харківська область	5 183	73 645	33	9 680	20 171	108 713
Херсонська область	4 696	94 397	2	9 680	13 212	121 987
Хмельницька область	3 406	28 321	29	298	18 719	50 774
Черкаська область	3 449	28 671	28	298	16 964	49 410
Чернівецька область	1 336	6 554	80	298	4 714	12 982
Чернігівська область	5 258	33 433	2	5 957	22 879	67 528
Територіальні води та внутрішні водойми		984 337				
Всього	99 323	2 173 770	1 272	80 494	362 161	2 717 019



ПОТЕНЦІАЛ «ЗЕЛЕНОГО» ВОДНЮ В УКРАЇНІ

Оцінка енергетичного потенціалу ВДЕ України та еквівалентного електролізу «зеленого» водню

Сценарій	ВДЕ	Джерело інформації	Потужність, ГВт	Середньорічне виробництво електроенергії, млрд кВт·год	Середньорічне виробництво «зеленого» водню, млрд кВт·год
	ВЕС	Разом, у тому числі:	466	1428	317
		оншор (IRENA)	320	858	191
		офшор (NREL)	146	570	126
	СЕС	IRENA	71	88	20
Базовий	Всього ВДЕ		537	1516	337
	ВЕС	Разом, у тому числі:	688	2174	483
		оншор (IBE НАНУ)	438	1190	254
		офшор (IBE НАНУ)	250	984	219
	СЕС	(IBE НАНУ)	83	99	22
Оптимістичний	Всього ВДЕ		771	2273	505
Песимістичний	Всього ВДЕ (сонце і вітер)	Енергетична стратегія України період до 2035 р.		25	5,5



Розподіл потенційного середньорічного виробітку «зеленого» водню, млн. н.куб.м

Область	млн. нЗ	тис. т
Автономна Республіка Крим	14 314	1274
Вінницька область	9 055	806
Волинська область	5 074	452
Дніпропетровська область	24 692	2198
Донецька область	20516	1826
Житомирська область	7 515	669
Закарпатська область	1 170	104
Запорізька область	21 029	1872
Івано-Франківська область	1 968	175
Київська область	8 263	735
Кіровоградська область	13 711	1220
Луганська область	20 646	1837
Львівська область	5 637	502
Миколаївська область	19 032	1694
Одеська область	22 173	1973
Полтавська область	9 818	874
Рівненська область	5 409	481
Сумська область	7 570	674
Тернопільська область	4 721	420
Харківська область	17 517	1559
Херсонська область	22 021	1960
Хмельницька область	7 051	628
Черкаська область	7 138	635
Чернівецька область	1 753	156
Чернігівська область	8 598	765
Разом	286390	25489
Територіальні води та внутрішні водойми	218 742	19468
Всього	505 133	44957



Навчально-методичне видання

Колесніков Валерій Олександрович

Конспект лекцій з курсу

**ГІБРИДНІ ТА ЕЛЕКТРИЧНІ ТРАНСПОРТНІ ЗАСОБИ.
ПІДРОЗДІЛ: «ВОДНЕВИЙ ТРАНСПОРТ ТА ВОДНЕВІ
ТЕХНОЛОГІЇ»**

для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського)
та другого (магістерського) рівня
денної та заочної форм навчання
спеціальності 015.38 «Професійна освіта»
освітньої-професійної програми «Транспорт»

За редакцією автора
Комп'ютерний макет – В. О. Колесніков

Здано до склад. 17.09.2023 р. Підп. до друку 17.10.2023 р.
Формат 60x84 1/16. Папір офсет. Гарнітура Times New Roman.
Друк ризографічний. Ум. друк. арк. 4,27. Наклад 300 прим. Зам
№ 121.

Видавець:
Видавництво Державного закладу
«Луганський національний університет імені Тараса Шевченка»
вул. Коваля, 3, м. Полтава, Полтавська область, 36003
тел: +38 095-105-6005; e-mail: mail@luguniv.edu.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3459 від
09.04.2009.