

НОВІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ВОДНЕВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

Левіна Д. А., Єршова О. Г.

Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України

Анотація. У статті висвітлено значення водневої енергетики для світу й України, можливості розвитку водневих технологій в Україні та інтегрування до європейської водневої системи. Розглянуто доробок вітчизняних учених зі створення матеріалів для отримання, зберігання й використання водню та запропоновано заходи щодо активізації наукових досліджень і розробок матеріалів для водневих технологій в Україні.

Ключові слова: декарбонізація, водень, воднева енергетика, водневі технології, паливні комірки.

Вступ

В останні десятиріччя глобальне потепління, спричинене надмірним виділенням парникових газів, досягло загрозливих темпів (рис. 1) [1].



Рис. 1. Підвищення температури поверхні Землі з кінця XIX століття

Основним складником парникового газу є вуглекислий газ, який виділяється внаслідок згоряння різних видів вуглецевого палива, що традиційно використовуються у світі як енергоносії (нафта, природний газ, вугілля, торф). Щоб запобігти загальному критичному впливу на клімат планети, Паризька конференція з питань клімату 2015 року прийняла Угоду, що закликає знизити темпи глобального потепління, обмеживши до 2050 року зростання середньої глобальної температури не більше, ніж на 1,5 °C щодо рівня 1990 року. Особливо екологічно перспективним є поєднання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) з водневими й паливно-комірчаними технологіями. Провідні країни світу вже розробили плани декарбонізації і свою національну стратегію економіки. Майже всі вони розглядають водень як одне з основних альтернативних джерел енергії. Екологічно важливим є значення зеленого водню, отриманого з використанням ВДЕ: сонячної, гео-

термальної, енергії вітру, гідроенергії, енергії хвиль і припливів.

В Європі для прискорення інноваційних розробок у галузі водню й паливних комірок (ПК) та їх упровадження створено асоціацію «Воднева Європа», яка об'єднує понад 100 промислових компаній, приблизно 68 науково-дослідних організацій, а також 11 національних водневих асоціацій. Асоціація тісно співпрацює з Рамковою програмою ЄС «Горизонт Європа» із Спільною ініціативою «ПК і Водень».

Дослідження в галузі водневої енергетики сприяють також розвитку інших важливих напрямів використання водню (теплові насоси, компресори водню, металогібридні акумулятори електрики, датчики тиску тощо) (рис. 2).

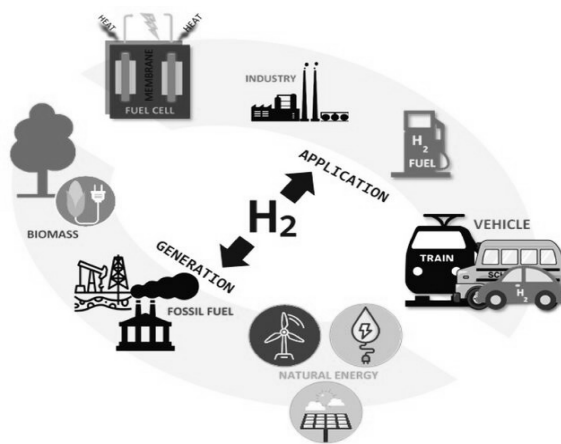


Рис. 2. Джерела генерації та сфери застосування водню

Водневі технології набувають особливої актуальності у відновленні й модернізації зруйнованої української енергетики. Для цього в Україні існують відповідні можливості: тут багато сонця й вітру, до того ж існує розгалужена газотранспортна система, пов'язана з країнами Євросоюзу.

Одним із ключових факторів для широкого впровадження водневих технологій та переходу до водневої економіки є зниження їх вартості, зокрема вартості використовуваних матеріалів [2].

Мета й постановка завдання

Упровадження водневих технологій вимагає розроблення багатьох матеріалів із відповідними функціональними властивостями для застосування в різноманітних засобах і умовах експлуатації. Українські вчені за комплексними програмами, присвяченими питанням водневої енергетики, виконали низку перспективних фундаментальних і прикладних досліджень для створення й упровадження таких матеріалів [3, 4].

Мета роботи – привернути увагу вчених до необхідності активізувати дослідження й розроблення матеріалів для водневої енергетики й на основі стислого огляду результатів попередніх робіт української наукової спільноти запропонувати заходи для підвищення ефективності таких матеріалів.

Виклад основного матеріалу

У сфері генерації водню у світі набули поширення три види виробництва водню: з викопного палива, біомаси й відходів електролізу води. Кожен з них вимагає застосування каталізаторів.

Каталізатори відіграють вирішальну роль в ефективності основних водневих технологій, таких як електроліз і паливні комірки. Найактивнішими каталізаторами для них є метали платинової групи: платина, іридій, рутеній. Однак висока вартість обмежує їх широке застосування. Українські матеріалознавці й хіміки здійснюють активний пошук більш дешевих і ефективних альтернатив благородним металам. Досліджуються й комбінуються різноманітні матеріали, а саме метали, сполуки на основі вуглецю, розробляються нові композитні матеріали, зокрема із застосуванням нанотехнологій, пропонуються нові методи синтезу й нанесення каталізаторів і випробовуються їх різні структури.

Генерація водню з викопного палива

Україна має значні ресурси викопного палива й ефективні водневі технології дають змогу використовувати їх із значно зменшеними викидами вуглекислого газу в атмосферу.

В Інституті фізичної хімії ім. Л. В. Писаржевського НАН України [5] розроблено перспективні вихідні каталітичні системи на

основі феритів Mn і Fe для процесу парової конверсії вуглеводнів. Рекомендовані оптимальні способи приготування й нанесення каталізаторів, зокрема на вуглецеві нанотрубки. Запропоновані каталізатори здатні забезпечувати високий ступінь конверсії етанолу й селективності отримання водню, не містять благородних та/або рідкісноземельних металів, стійкі до карбонізації та не потребують додаткових витрат водню на відновлення активної металевої фази. З їх використанням створена діюча лабораторна модель портативного автономного каталітичного генератора водню, який має просту технологічну схему й зручний в експлуатації.

У спільній роботі Інституту фізичної хімії ім. Л. В. Писаржевського та Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України вдосконалено склад і структуру нікельвмісних анодів і каталізаторів для досягнення більш високих ресурсних показників у процесі окислювального риформінгу вуглеводнів [6].

Структуровані нікель-алюмооксидні каталізатори виробляються за золь-гель-технологією, яка дає змогу створити на поверхні керамічних матриць стільникової кордієритої структури стійкий до зауглецювання та дії сполук сірки, здатний до регенерації, каталітично активний шар $\text{Ni-Al}_2\text{O}_3$ із вмістом оксидів рідкісноземельних елементів. Як наслідок, удвічі збільшена продуктивність структурованих каталізаторів та скорочені у два-чотири рази витрати активних компонентів порівняно з гранульованими каталізаторами.

Генерація водню електролізом

Розщеплення води лужним електролізом добре підходить для виробництва водню в промислових масштабах завдяки своїй ефективності, масштабованості та здатності інтегруватися з ВДЕ для сталого виробництва водню.

В Інституті проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України розроблений лужний електролізер з газопоглинальним електродом, що дає змогу за допомогою сонячної енергії безперервно почергово отримувати водень і кисень [7].

Реакція розкладання води відбувається безперервно з почерговим виділенням водню й кисню в електролізній камері з відбором цих газів у відповідні лінії високого тиску. Електролізер може функціонувати із сонячним джерелом енергії без будь-якого проміжного інверторного обладнання.

За цим самим напрямом співробітники Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України дослідили каталітичний вплив низки композиційних матеріалів на основі магнію з каталітичними добавками. Наноккомпозити на основі MgH_2 з використанням різноманітних каталітичних добавок випробувані як матеріали для генерації водню гідролізом, полегшують гідрогенізацію магнію під час реактивного кульового помелу, значно покращують кінетику поглинання-десорбції водню та підвищують швидкість і вихід виділення водню в реакціях гідролізу. Найкращі параметри спостерігалися для композитів із домішками нанопорошків перовскиту $\text{Nd}_{0,5}\text{Ho}_{0,5}\text{FeO}_3$, протестованих як матеріали, рекомендовані для генерації водню [8].

Мембранні електролізери

Для масового впровадження електролізних технологій ефективними є мембранні електролізери з їх придатністю для незначних застосувань, наприклад телефони, ноутбуки. Електроліз води на протоннообмінній мембрані (ПОМ) ґрунтується на використанні мембрани, що пропускає лише протони, полегшуючи розділення водню та кисню. Перевагами ПОМ є: висока ефективність, швидка реакція на зміни вхідної електроенергії, компактна конструкція, висока щільність струму, невеликі розміри, невисока температура експлуатації (20–80 °C) і чистота отримуваних водню та кисню. Для широкого впровадження цієї технології необхідне створення ефективних і дешевих матеріалів для мембран.

Науковці Інституту загальної та неорганічної хімії ім. В. І. Вернадського НАН України розробили для мембран електрохімічний метод отримання частково розкритих багатопорових вуглецевих нанотрубок і наноккомпозитів на їх основі, а також удосконалено процес синтезу й нанесення на них каталізаторів [9].

Розроблені протоннообмінні мембрани були використані для створення алюмоводневого генератора. Застосований як енергоакумулятор алюміній – один з найпоширеніших металів – дає змогу зберігати значну кількість енергії в невеликому об'ємі, має значний потенціал для створення портативних пристроїв і демонструє здатність до масштабування як для невеликих, так і для великих систем.

Проблему, однак, становить оксидна плівка, що утворюється на поверхні алюмінію

внаслідок контакту з водою та гальмує реакцію. Для алюмоводневих генераторів оптимізовано склади енергоакумуляуючих матеріалів на основі алюмінію легуванням легкоплавкими евтектичними сплавами системи Ga-In-Sn з метою зниження температури виділення водню з води до температури довкілля, за якої сповільнюється процес окиснення алюмінію.

Ці матеріали є перспективними в подальшому застосуванні для живлення паливних комірок. З їх використанням створено макет дослідного зразка воднево-повітряної паливної батареї на 5 Вт.

В Інституті хімії високомолекулярних сполук НАН України запропоновано методи синтезу полімерів кислотного-основного типу (кремнійорганічні сполуки) гіперрозгалуженої та зіркоподібної будови, здатні до йонної провідності в безводних умовах. Органо-неорганічні полімерні йонообмінні мембрани, отримані за допомогою цього методу, визначаються термічною стабільністю до 300 °C та величинами протонної провідності, що дають змогу вважати їх перспективними для використання як твердих поліелектролітів у паливних комітках для експлуатації за температури понад 100 °C у безводних умовах, а також за температури нижче ніж 80 °C у лужному середовищі [10].

Зберігання водню

Можливість тривалого зберігання водню як проміжного джерела енергії є перевагою, що робить його привабливим для автономних енергосистем. Недоліками традиційного зберігання водню в рідкому або газоподібному стані є необхідність високого тиску, значна маса й об'єм контейнерів у розрахунок на одиницю маси водню, чималі витрати енергії на зрідження.

Перспективним для подолання цих проблем є використання твердих сполук – гідридів металів та інтерметалідів, які визначаються тим, що об'єм поглиненого ними водню в кілька разів перевищує об'єм вихідного матеріалу.

Металогідридному методу зберігання водню властива висока компактність, безпека й не дуже високі енерговитрати. Найновіші дослідження матеріалів для зберігання водню значною мірою присвячені гідриду магнію MgH_2 та його сплавам, що отримують із застосуванням методів механохімії. Ці матеріали мають покращені водень-сорбційні ємності, поліпшені кінетичні властивості та циклічну стабільність.

Дослідження, що провели науковці Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, спрямовані на створення технологій виготовлення високовмісних водень-сорбційних матеріалів на основі магнію з комплексом властивостей, що забезпечують практичне використання матеріалів у стаціонарних системах зберігання водню.

Вивчення взаємозв'язку стану поверхні гідридів і кінетики їх утворення / розкладу, а також виявлена ними кореляція між водень-сорбційними, термодинамічними властивостями гідридів та впливом різних складників (насамперед йонного) в хімічний зв'язок «водень – метал» дали змогу розробити ефективні технології модифікування та легування матеріалів на основі магнію [11]. Незначні добавки (5–10 мас. %) легуючих елементів Ti, Fe, Ni, Si, TiC призводять до суттєвого зниження термічної стійкості та покращення кінетики розкладу гідриду MgH_2 за робочого тиску в реакторі 0,1 МПа й температури 320 °С.

Розроблений спосіб отримання нанорозмірних механічних сплавів дав змогу виготовити сплав складу Mg +10 мас.% Ni, який продемонстрував 16-кратне скорочення часу виділення водню порівняно з MgH_2 без добавки Ni [12].

Водневі ємності розроблених нанокомпозитів досягають 6,1–6,5 мас.%, (що задовольняє вимоги Міжнародної енергетичної асоціації до матеріалів-накопичувачів водню мати 5,5–6,0 мас.% H_2).

У Фізико-механічному інституті ім. Г. В. Карпенка досягнуто поглинання водню до 6,5 мас. % під час помелу у водні композитів складу 90 мас.% Mg + 10 мас. % TiN/ZrN. [8].

Українські вчені розробили накопичувачі водню, що можуть бути використані для практичного застосування як водень-сорбційні матеріали в стаціонарних металогідридних системах зберігання водню, у значних кількостях у системах його транспортування від джерел відновлюваної енергії до її споживачів, а також в системах автономного енергозабезпечення в комплексі з високотемпературними твердооксидними паливними комітками.

Паливні комітки. Фотоелектрохімічні паливні комітки

Науковці Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України розробили матеріали й конструкцію фотоелектрохімічної паливної комітки з модифіко-

ваним фотоелектродом і системою накопичення водню – металогідрид / повітряний електрод, у якому хімічна енергія водню, накопиченого метал-гідридним електродом у разі фотоелектрохімічного заряду, використовується для генерування електричної енергії.

Фотоанодом слугують наногетероструктури на основі плівок графенових структур, катодом слугують водень-сорбційні матеріали на основі інтерметалідної сполуки $LaNi_5$ [13].

Система працює як паливна комітка з вбудованою ємністю, у якій водневе паливо в аноді накопичується за умови фотоелектрохімічного заряду під дією сонячного світла у вигляді гідриду. У комітці використовується повітряний електрод. Застосування кисню з безплатно доступного повітря дає змогу значно зменшити масу й вартість джерела струму завдяки відсутності тяжких і вартісних окисників.

Значне збільшення питомої енергії на одиницю ваги (приблизно 15–20 %) досягається ще й способом заміни важкого металевго електрода легким повітряним. Паливна комітка функціонує як акумулятор, що перезаряджається подібно до звичайного вторинного джерела струму, але в процесі перезарядження не витрачає електроенергію або газоподібний водень.

Розроблені конструкції фотоелектрохімічних паливних коміток (рис. 3) випробувані під час опромінення світлом і визначені перспективи їх практичного використання.

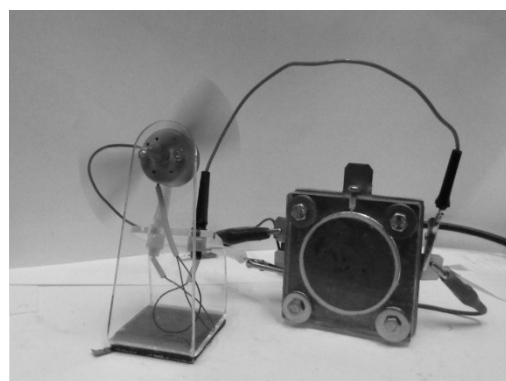


Рис. 3. Фотоелектрохімічна паливна комітка

Накопичувачі водню

Багатокомпонентність гідридних систем забезпечує можливість створення накопичувачів з регульованим вмістом водню і роботу в заданих термодинамічних умовах.

В Інституті проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України на основі

дослідження водень-сорбційних властивостей сплавів лантан-нікель-церієвої системи обрано оптимальний склад сплаву, який був підібраний таким чином, щоб забезпечити рівноважний тиск водню над металогідридом ~ 10 бар за кімнатної температури. Сконструйовано та виготовлено накопичувачі водню з використанням інтерметаліду зі складом, близьким до LaNi_5 , у якому частина атомів La замінені атомами Се.

Накопичувачі призначені для забезпечення паливних елементів воднем високої чистоти [14]. Вони укомплектовані термостатованими теплообмінниками, що живляться від джерел постійного струму 12 В (рис. 4).



Рис. 4. Накопичувачі водню високого тиску

Твердооксидні паливні елементи (ТОПЕ) мають значний потенціал для застосування завдяки високому ККД (який може досягати 60 % і більше), що робить їх одними з найбільш ефективних енергетичних перетворювачів, а також здатності використання різних видів палива (зокрема природний газ, біогаз, вуглеводні та водень) і можливості когенерації, тобто одночасного виробництва електроенергії та тепла.

У ТОПЕ застосовується твердий керамічний електроліт, зазвичай на основі діоксиду цирконію, стабілізованого складними оксидами скандію та церію, що проводить йони кисню за високих температур 700–1000 °С, в кількості, необхідній для достатньої йонної провідності твердого електроліту.

Активні дослідження в галузі твердооксидних паливних елементів спрямовані на зниження робочої температури ТОПЕ, яке б сприяло використанню більш дешевих матеріалів, спрощенню технологічних процесів, зменшенню темпів деградації матеріалів у процесі експлуатації, а також надало б мож-

ливості застосування ТОПЕ в більш широкому діапазоні температур, наприклад, у портативних пристроях.

Результатом спільної роботи вчених Інституту загальної та неорганічної хімії ім. В. І. Вернадського, Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича, Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка та Інституту надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля створений паливний елемент з робочою температурою приблизно 600 °С [15, 16].

Для використання як електроліту й протон-провідних мембран паливного елемента було синтезовано й досліджено властивості матеріалів на основі стабілізованого оксиду цирконію – для анода – на основі $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3\text{-NiO}$, для твердого електроліту – на основі $\text{ZrO}_2\text{-Sc}_2\text{O}_3\text{-CeO}_2$. Для виготовлення анода й електроліту запропоновано й відпрацьовано технологію стрічкового лиття. Анод було вдосконалено способом створення градієнтної структури з використанням багатошарових стрічкових структур на основі товстих плівок.

Забезпечення необхідних механічних і функціональних властивостей плівок досягається завдяки застосуванню комбінації таких методів оброблення, як лиття й ламінування з подальшим термообробленням. Випробування паливної комірки продемонструвало максимальну питому потужність на рівні 4,2 мВт/см², тоді як комерційна становила лише 2,8 мВт/см².

Для з'єднувальних деталей батарей ТОПЕ зазвичай використовують хромвмісні феритні сталі, які мають високу питому щільність і не відповідають вимогам щодо міцності, стійкості до окислення, електропровідності тощо.

У розробленому ТОПЕ застосовано тонку (0,5 мм) пластину титану з нанесеним вакуумно-дуговим методом покриттям зі сплаву системи Ti-Al-C. Цій пластині властива висока стійкість до окислення та електропровідність, що пов'язано з утворенням стійких до окислення електропровідних MAX-фази Ti_3AlC (з кристалічною структурою антиперовскіту), TiAl і Ti_3Al . Це також дає змогу значно (на ~ 50 %) зменшити вагу ТОПЕ батарей [17].

Наведені вище розробки українських учених у галузі ТОПЕ можуть стати основою для створення промислового виробництва енергосистем ТОТЕ в нашій країні, до того ж Україна має одне з найбільших у світі родо-

вищ цирконію – основної сировини для виробництва стабілізованих порошків діоксиду цирконію.

Висновки

У багатьох розглянутих роботах успішно співпрацюють матеріалознавці, хіміки, фіз-хіміки, біохіміки. Це підтверджує необхідність і плідність міждисциплінарного й комплексного підходу до виконання складних завдань водневого матеріалознавства.

Проаналізований доробок українських учених за напрямом водневого матеріалознавства свідчить про їхній вагомий внесок у глобальні зусилля для розв'язання енергетичної кризи. Результати вітчизняних досліджень мають значний потенціал для прискорення переходу до більш чистої та сталої водневої енергетики.

Для підвищення ефективності та масштабування результатів наукових праць у галузі матеріалів для водневої енергетики, на думку авторів, в Україні корисними були б такі заходи:

- підготовка фахівців із поглибленими знаннями в галузі воднетехнологічних матеріалів;

- активізація обміну міжнародним досвідом (участь у міжнародних конференціях, стажування за кордоном);

- залучення до міжнародних програм і проєктів (міжнародні гранти, ЄС програма Горизонт Європа, Спільна ініціатива «ПК і Водень»);

- створення малих підприємств із залученням, крім науковців різної спеціалізації, конструкторів, виробників та інших фахівців для масштабування й упровадження результатів досліджень.

Література

1. Global Temperature Anomaly. URL: <https://www.svg> (дата звернення: 10.09.2023).
2. Kudria S. Atlas of Energy Potential of Renewable Energy Sources of Ukraine. Kyiv, 2020, 45p. URL: <https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/atlas.pdf> (дата звернення: 19.03.2021).
3. Розвиток наукових засад отримання, зберігання та використання водню в системах автономного енергозабезпечення: зб. статей за матер. наукової звітної сесії. Київ, 2019. 35 с.
4. Водень в альтернативній енергетиці та новітніх технологіях: зб. статей за матер. наукової звітної сесії / заг. ред. В. В. Скорохода і Ю. М. Солоніна. Київ, 2015. 370 с.
5. Dolgikh L. Y., Trypolskyi A. I., Stolyarchuk I. L., Stara L. O., Pyatnitsky Y. I., Strizhak P. E. Autonomous catalytic hydrogen generator from

raw bio-materials Ukraine. *Hydrogen based energy storage: status and recent developments: monograph* / eds. V. A. Yartys, Yu. M. Solonin, I. Yu. Zavaliy. Lviv, 2021. P.140–147. <https://doi.org/10.15407/materials2021>.

6. Soloviev S. O., Kyriienko P. I., Samoylenko D. E., Kurylets Ya. P., Kapran A. Yu. Development of nanostructured catalysts and new technological solutions for the processing of biogas with the production of hydrogen fuel for the methane conversion unit of high-temperature fuel cells. *Hydrogen based energy storage: status and recent developments: monograph* / eds. V. A. Yartys, Yu. M. Solonin, I. Yu. Zavaliy. Lviv, 2021. P. 252–257. <https://doi.org/10.15407/materials2021>.
7. Solovey V. V., Zipunnikov M. M., Semikin V. M., Vorobjova I. O. High pressure membraneless electrolyser for helio-hydrogen power plants. *Hydrogen based energy storage: status and recent developments: monograph* / eds. V. A. Yartys, Yu. M. Solonin, I. Yu. Zavaliy. Lviv, 2021. P. 114–121. <https://doi.org/10.15407/materials2021>.
8. Zavaliy I., Berezovets V., Vasylenko L., Lyutyy P., Kosarchun Yu. Hydrogen storage and generation properties of new MgH_2 based composites. *Hydrogen based energy storage: status and recent developments: monograph* / eds. V. A. Yartys, Yu. M. Solonin, I. Yu. Zavaliy. Lviv, 2021. P.189–1980. <https://doi.org/10.15407/materials2021>.
9. Manilevich F., Pirskey Yu., Kutsyi A., Berezovets V., Yartys V. Activated aluminum for hydrogen generation from water. *Hydrogen based energy storage: status and recent developments: monograph* / eds. V. A. Yartys, Yu. M. Solonin, I. Yu. Zavaliy. Lviv, 2021. P. 81–93. <https://doi.org/10.15407/materials2021>.
10. Кирієнко П. І., Капран А. Ю., Курилець Я. П., Ларіна О. В., Соловйов С. О. Розроблення наноструктурованих каталізаторів та нових технологічних рішень для переробки біогазу з отриманням водневого палива для модуля конверсії метану високотемпературних паливних елементів. *Розвиток наукових засад отримання, зберігання та використання водню в системах автономного енергозабезпечення. Матеріали наукової звітної сесії. ПІМ НАН України. Київ, 2019. С. 3.*
11. Ersova O., Dobrovolsky V., Solonin Yu. Development of physicochemical principles for the creation of highcapacity hydride-forming materials and their use in stationary hydrogen storage systems and as electrodes for electrochemical energy systems. *Hydrogen based energy storage: status and recent developments: monograph* / eds. V. A. Yartys, Yu. M. Solonin, I. Yu. Zavaliy. Lviv, 2021. P. 77–88. <https://doi.org/10.15407/materials2021>.
12. Ershova O. G., Dobrovolsky V. D., Solonin Y. M. Mechanical alloys Mg-Me (Me: Ti, Fe, Ni, Al) &

- Mg-Me1-Me2(Me1 :Al, Me2 : Ti, Fe, Ni) with low resistance and improved kinetics of hydrogenation / dehydrogenation for hydrogen storage applications. *French-Ukraine Journal of Chemistry*. 2018. V. 6, № 1. P. 31–55.
13. Rusetskyi I., Danilov M., Fomanyuk S., Smilyk V., Kolbasov G., Scherbakova L., Krapivka A., Graivoronskaya K., Solonin Yu. Portable photo-electrochemical cells with hydrogen storage. Creation MH electrodes with a given set of technological characteristics and it testing for compatibility, and charging efficiency paired with a photoanode in a PEC cell. *Hydrogen based energy storage: status and recent developments: monograph* / eds. V. A. Yartys, Yu. M. Solonin, I. Yu. Zavaliy. Lviv, 2021. P. 148–154. <https://doi.org/10.15407/materials2021>.
 14. Щур Д. В., Боголепов В. О., Савенко О. Ф., Матисіна З. А., Золотаренко Ол. Д., Золотаренко Ан. Д., Золотаренко О. Д., Мелешевич К. А., Камінецька О. А., Копилова Л. І., Шапошнікова Т. І. Розробка джерел водню для паливних комірок. *Водень в альтернативній енергетиці та новітніх технологіях: монографія* / за заг. ред. В. В. Скорохода і Ю. М. Солоніна. Київ, 2015. С. 220–227.
 15. Brodnikovsky Y., Vasiliev O., Polishko I., Lysunenko N., Kovalenko L., Ivanchenko S., Brodnikovskiy D., Chedryk V., Brodnikovska I., Horda R., Smyrnova-Zamkova M., Marek I., Myslyvchenko O., Orlyk A., Bilous A., Vereschak V., Nosyk A. Development of tape casting technique regimes for manufacturing of solid oxide fuel cells. *Hydrogen based energy storage: status and recent developments: monograph* / eds. V. A. Yartys, Yu. M. Solonin, I. Yu. Zavaliy. Lviv, 2021. P. 229–237. <https://doi.org/10.15407/materials2021>.
 16. Vyunov O., Kovalenko L., Yanchevsky O., Polishko I., Ivanchenko S., Lysunenko N., Brodnikovskiy D., Chedryk V., Brodnikovska I., Vasiliev O. Structural, impedance and electron-microscope studies of multilayer systems for low-temperature (600 °C) fuel cell. *Hydrogen based energy storage: status and recent developments: monograph* / eds. V. A. Yartys, Yu. M. Solonin, I. Yu. Zavaliy. Lviv, 2021. P. 222–228. <https://doi.org/10.15407/materials2021>.
 17. Ostash O., Vasyliiv B., Podhurska V., Vasyliiv O., Brodnikovskii Ye., Polishko I., Danilenko I., Shylo A., Prikhna T., Sverdun V., Kuprin O. Elaboration and study of materials for anodes and interconnects of lightweight solid oxide fuel cells. *Hydrogen based energy storage: status and recent developments: monograph* / eds. V. A. Yartys, Yu. M. Solonin, I. Yu. Zavaliy. Lviv, 2021. P. 207–212. <https://doi.org/10.15407/materials2021>.
 2. Kudria S. Atlas of Energy Potential of Renewable Energy Sources of Ukraine. Kyiv, 2020, 45 p. Retrived from: <https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/atlas.pdf>
 3. Rozvytok naukovykh zasad otrymanna, zberigannya ta vykorystannya vodniu v systemakh avtonomnogo energosabezpechennia [Development of scientific principles for obtaining, storing and using hydrogen in autonomous energy supply systems] *Reglament ta programa. Materialy naukovoї zvitnoi sesii*. Kyiv, 2019. 35 s. [in Ukraine].
 4. Voden v alternatyvni energetytsi ta novitnikh tehnologijakh [Hydrogen in alternative energy and new technologies]: monographiya / zag. red. V. V. Skorokhoda i Yu. M. Solonina. Kyiv, 2015. 370 s. [in Ukraine].
 5. Dolgikh L. Y., Trypolskyi A. I., Stolyarchuk I. L., Stara L. O., Pyatnitsky Y. I., Strizhak P. E. Autonomous catalytic hydrogen generator from raw bio-materials Ukraine. *Hydrogen based energy storage: status and recent developments: monograph* / eds. V. A. Yartys, Yu. M. Solonin, I. Yu. Zavaliy. Lviv, 2021. P. 140–147.
 6. Soloviev S. O., Kyriienko P. I., Samoylenko D. E., Kurylets Ya. P., Kapran A. Yu. Development https t of nanostructured catalysts and new technological solutions for the processing of biogas with the production of hydrogen fuel for the methane conversion unit of high-temperature fuel cells. *Hydrogen based energy storage: status and recent developments: monograph* / eds. V. A. Yartys, Yu. M. Solonin, I. Yu. Zavaliy. Lviv, 2021. P. 252–257. <https://doi.org/10.15407/materials2021>.
 7. Solovey V. V., Zipunnikov M. M., Semikin V. M., Vorobjova I. O. High pressure membraneless electrolyser for helio-hydrogen power plants. *Hydrogen based energy storage: status and recent developments: monograph* / eds. V. A. Yartys, Yu. M. Solonin, I. Yu. Zavaliy. Lviv, 2021. P. 114–121. <https://doi.org/10.15407/materials2021>.
 8. Zavaliy I., Berezovets V., Vasylenko L., Lyutyy P., Kosarchun Yu. Hydrogen storage and generation properties of new MgH₂ based composites. *Hydrogen based energy storage: status and recent developments: monograph* / eds. V. A. Yartys, Yu. M. Solonin, I. Yu. Zavaliy. Lviv, 2021. P. 189–198. <https://doi.org/10.15407/materials2021>.
 9. Manilevich F., Pirskey Yu., Kutsyi A., Berezovets V., Yartys V. Activated aluminum for hydrogen generation from water. *Hydrogen based energy storage: status and recent developments: monograph* / eds. V. A. Yartys, Yu. M. Solonin, I. Yu. Zavaliy. Lviv, 2021. P. 81–93. <https://doi.org/10.15407/materials2021>.
 10. Kyriienko P. I., Kapran A. Yu., Kurylets' Ya. P., Larina O. V., Solovyov S. O. Rozroblennya nanostrukturovanykh kata-lizatoriv ta novykh tekhnolohichnykh rishen' dlya pererobky biohazu

References

1. Globalna temperaturna anomalija [Global Temperature Anomaly]. Retrived from: <http://www.svg> (accessed: 10.09.2023). [in Ukraine].

- z otrymannyam vodnevoho palyva dlya modulya konversiyi metanu vysokotemperaturnykh palyvnykh elementiv. [Development of nanostructured catalysts and new technological solutions for biogas processing to obtain hydrogen fuel for the methane conversion module of high-temperature fuel cells] Materialy Naukovoyi zvitnoyi sesiyi. IPM NAN Ukrainy: "Rozvytok naukovykh zasad otrymannya, zberihannya ta vykorystannya vodnyu v systemakh avtonomnoho enerhozabezpechennya". Kyiv, 2019. S. 3. [in Ukraine].
11. Ersova O., Dobrovolsky V., Solonin Yu. Development of physicochemical principles for the creation of highcapacity hydride-forming materials and their use in stationary hydrogen storage systems and as electrodes for electrochemical energy systems. *Hydrogen based energy storage: status and recent developments: monograph* / eds. V. A. Yartys, Yu. M. Solonin, I. Yu. Zavaliy. Lviv, 2021. P. 77–88. <https://doi.org/10.15407/materials2021>.
 12. Ershova O. G., Dobrovolsky V. D., Solonin Y. M. Mechanical alloys Mg-Me (Me: Ti, Fe, Ni, Al) & Mg-Me1-Me2 (Me1: Al, Me2: Ti, Fe, Ni) with low resistance and improved kinetics of hydrogenation /dehydrogenation for hydrogen storage applications. *French-Ukraine Journal of Chemistry*. 2018. V. 6, № 1. P. 31–55.
 13. Rusetskyi I., Danilov M., Fomanyuk S., Smilyk V., Kolbasov G., Scherbakova L., Krapivka A., Graivoronskaya K., Solonin Yu. Portable photoelectrochemical cells with hydrogen storage. Creation MH electrodes with a given set of technological characteristics and it testing for compatibility, and charging efficiency paired with a photoanode in a PEC cell. *Hydrogen based energy storage: status and recent developments: monograph* / eds. V. A. Yartys, Yu. M. Solonin, I. Yu. Zavaliy. Lviv, 2021. P. 148–154. <https://doi.org/10.15407/materials2021>.
 14. Shchur D. V., Boholepov V. O., Savenko O. F., Matysina Z. A., Zolotarenko Ol. D., Zolotarenko An. D., Zolotarenko O. D., Meleshevych K. A., Kaminets'ka O. A., Kopylova L. I., Shaposhnikova T. I. Rozrobka dzherel vodnyu dlya palyvnykh komirok. [Development of hydrogen sources for fuel cells]. V monohrafiyi "Voden' v al'ternatyvnyi enerhetytsi ta novitnikh tekhnolohiyakh" / za zah. redaktsiyeyu V. V. Skorokhoda i Yu. M. Solonina. Kyiv, 2015. S. 220–227. [in Ukraine].
 15. Brodnikovsky Y., Vasiliev O., Polishko I., Lysunenko N., Kovalenko L., Ivanchenko S., Brodnikovskiy D., Chedryk V., Brodnikovska I., Horda R., Smyrnova-Zamkova M., Marek I., Myslyvchenko O., Orlyk A., Bilous A., Vereschak V., Nosyk A. Development of tape casting technique regimes for manufacturing of solid oxide fuel cells. *Hydrogen based energy storage: status and recent developments: monograph* / eds. V. A. Yartys, Yu. M. Solonin, I. Yu. Zavaliy. Lviv, 2021. P. 229–237. <https://doi.org/10.15407/materials2021>.
 16. Vyunov O., Kovalenko L., Yanchevsky O., Polishko I., Ivanchenko S., Lysunenko N., Brodnikovsky D., Chedryk V., Brodnikovska I., Vasiliev O. Structural, impedance and electron-microscope studies of multilayer systems for low-temperature (600 °C) fuel cell. *Hydrogen based energy storage: status and recent developments: monograph* / eds. V. A. Yartys, Yu. M. Solonin, I. Yu. Zavaliy. Lviv, 2021. P. 222–228. <https://doi.org/10.15407/materials2021>.
 17. Ostash O., Vasylyv B., Podhurska V., Vasyliiev O., Brodnikovskii Ye., Polishko I., Danilenko I., Shylo A., Prikhna T., Sverdun V., Kuprin O. Elaboration and study of materials for anodes and interconnects of lightweight solid oxide fuel cells. *Hydrogen based energy storage: status and recent developments: monograph* / eds. V. A. Yartys, Yu. M. Solonin, I. Yu. Zavaliy. Lviv, 2021. P. 207–212. <https://doi.org/10.15407/materials2021>.

Левіна Діана Анатоліївна, канд. фіз.-мат. наук,
ст. наук. співр.,
e-mail: dianalevina768@gmail.com,
тел. +38 066-654-61-18;

Єршова Ольга Георгіївна, канд. техн. наук,
ст. наук. співр.,
e-mail: dobersh2017@ukr.net,
тел. +38 095-243-47-63.

Інститут проблем матеріалознавства
ім. І. М. Францевича НАН України,
вул. Омеляна Пріцака, 3; 03142, Київ.

New Materials for Hydrogen Energy

Abstract. Problem. Hydrogen is globally recognized as one of the primary energy sources, serving as a vital alternative to hydrocarbons. Ukrainian scientists have conducted a range of studies focused on the creation, implementation, and cost reduction of materials crucial for various hydrogen energy applications. **Goal.** The aim of this work is to draw the attention of the scientific community to the need for intensifying research and development of materials for hydrogen energy. Furthermore, based on a brief review of the results of previous work by Ukrainian scientists, the goal is to propose measures to increase the efficiency of these efforts. **Presentation of the Main Material.** Effective catalysts have been developed for fundamental hydrogen technologies, such as electrolysis and fuel cells, to replace the traditionally used and expensive platinum group metals. Technologies have been created for the manufacture of high-capacity water-absorbing materials based on magnesium, possessing a set of characteristics that ensure their practical use in stationary hydrogen storage systems. A photoelectrochemical fuel cell has been developed. In this device, hydrogen is stored as a hydride during photoelectrochemical charging under the influence of sunlight. It

functions as a conventional battery but does not consume electricity or gaseous hydrogen during recharging. A solid oxide fuel cell (SOFC) with an operating temperature of approximately 600 °C has been developed. Materials based on stabilized zirconium oxide have been synthesized for use as the electrolyte and proton-conducting membranes in the SOFC. Thick films of this material were manufactured using tape casting technology. Furthermore, gradient structures for the anode were manufactured using these thick films. The developed SOFC demonstrated a maximum specific power one and a half times higher than that of a commercial SOFC. These works can form the basis for creating the industrial production of SOFC energy systems in Ukraine, especially considering that Ukraine possesses one of the world's largest deposits of zirconium, the main raw material for producing stabilized zirconium dioxide powders. **Results. Originality.** This review of the work of Ukrainian scientists highlights their significant contribution to global efforts to solve the energy crisis. The results of their

research hold substantial potential for accelerating the transition to cleaner and more sustainable hydrogen energy. **Practical Value.** To increase the efficiency of scientific research and development, the authors propose a number of measures related to the training of specialists and the scaling up of the results of scientific developments.

Key words: decarbonization, hydrogen, hydrogen energy, hydrogen technologies, fuel cell.

Levina Diana, Ph.D. in Physics and Mathematics, Senior Research Associate, e-mail: dianalevina768@gmail.com, tel. +38 066-654-61-18;

Yershova Olga, Ph.D. in Engineering, Senior Research Associate, e-mail: dobersh2017@ukr.net, tel. +38 095-243-47-63.

Institute for Problems of Materials Science named after I.M. Frantsevich, NAS of Ukraine, 3 Omelyan Pritsaka St.; 03142, Kyiv.
