

<https://doi.org/10.31891/2307-5740-2024-336-92>

УДК 662.769:620.9(477)

КРАВЧИК Юрій

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-2780-5605>

yrii.kravchuk@khnmu.edu.ua

КАТКОВА Тетяна

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0001-5209-3139>

ІННОВАЦІЙНІ РІШЕННЯ ДЛЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА ВОДНЮ: ПЕРСПЕКТИВИ ДЛЯ УКРАЇНИ

Метою наукової статті є аналіз та обґрунтування інноваційних рішень, спрямованих на підвищення енергоефективності виробництва водню, із визначенням перспектив їх впровадження в Україні. У статті розглядається розвиток водневої енергетики, як важливий етап переходу до сталого енергетичного майбутнього. В Україні значний потенціал для впровадження водневих технологій створюється завдяки природним ресурсам, таким як сонячна та вітрова енергія. Проте, попри ці можливості, процес виробництва водню залишається енергоємним, що підвищує важливість розробки інноваційних технологій для зниження енергетичних витрат. Одним із ключових аспектів є вдосконалення технологій електролізу, а також впровадження нових методів транспортування водню. Стаття також акцентує на необхідності подолання технічних та економічних бар'єрів, що стримують розвиток водневої енергетики в Україні. Зокрема, розглядаються новітні досягнення у сфері електролізерів, таких як лужні та протонно-обмінні мембрани, а також успіхи у сфері транспортування водню, що відкривають нові можливості для комерційного використання водню. Розвиток інновацій у водневому виробництві дозволяє знизити залежність від критичних матеріалів, збільшити термін експлуатації електролізерів та підвищити їх ефективність. Враховуючи тенденції глобальних лідерів, Україна має потенціал для інтеграції водню в національну енергетичну систему, зокрема через розвиток інфраструктури для зберігання та транспортування водню. Зокрема, інновації у мембранних технологіях, такі як розробка нових мембран для електролізерів, дають змогу значно підвищити ефективність виробництва водню, зменшуючи використання дорожочінних металів. У статті також розглядається потенційна участь України в міжнародних проєктах, таких як HORIZON-JTI-CLEANH2-2024-02-04, що мають на меті покращення технологій компресії та транспортування водню, що сприятиме зниженню витрат на виробництво зеленого водню та підвищенню енергоефективності.

Ключові слова: воднева енергетика, енергоефективність, виробництво водню, відновлювальні джерела енергії, електролізери, інноваційні технології, інфраструктура, транспортування.

KRAVCHYK Yuriy, KATKOVA Tetiana

Khmelnytskyi National University

INNOVATIVE SOLUTIONS FOR ENERGY-EFFICIENT HYDROGEN PRODUCTION: PROSPECTS FOR UKRAINE

The aim of this scientific article is to analyze and justify innovative solutions aimed at enhancing the energy efficiency of hydrogen production, with a focus on the prospects for their implementation in Ukraine. The article examines the development of hydrogen energy as a crucial stage in the transition towards a sustainable energy future. Ukraine has significant potential for the deployment of hydrogen technologies due to its natural resources, such as solar and wind energy. However, despite these opportunities, hydrogen production remains energy-intensive, highlighting the importance of developing innovative technologies to reduce energy consumption.

One of the key aspects is the improvement of electrolysis technologies, as well as the implementation of new methods for hydrogen transportation. The article also emphasizes the need to overcome technical and economic barriers that hinder the development of hydrogen energy in Ukraine. In particular, recent advancements in electrolyzer technologies, such as alkaline and proton exchange membrane (PEM) electrolyzers, are discussed, along with achievements in hydrogen transportation that open new opportunities for its commercial use.

The development of innovations in hydrogen production helps reduce dependence on critical materials, extend the lifespan of electrolyzers, and improve their efficiency. Considering global trends, Ukraine has the potential to integrate hydrogen into its national energy system, especially through the development of infrastructure for hydrogen storage and transportation. Notably, innovations in membrane technologies, such as the development of new membranes for electrolyzers, can significantly enhance hydrogen production efficiency while reducing the use of precious metals.

The article also explores Ukraine's potential participation in international projects, such as HORIZON-JTI-CLEANH2-2024-02-04, aimed at improving hydrogen compression and transportation technologies. This would contribute to lowering the costs of green hydrogen production and increasing energy efficiency.

Keywords: hydrogen energy, energy efficiency, hydrogen production, renewable energy sources, electrolyzers, innovative technologies, infrastructure, transportation.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Воднева енергетика є ключовим напрямом розвитку відновлюваних джерел енергії, що сприяє зниженню вуглецевого сліду та забезпеченню енергетичної безпеки. Сучасні технології виробництва водню охоплюють електроліз води, реформінг природного газу з уловлюванням вуглецю та інноваційні методи,

такі як фотокаталітичне розщеплення води. Основною проблемою є висока енергоємність процесів та значні витрати на обладнання, що вимагає впровадження нових технологічних рішень. Інноваційні розробки спрямовані на підвищення ефективності електролізерів, зменшення залежності від дефіцитних матеріалів і збільшення терміну служби обладнання. Крім того, перспективними напрямками є виробництво водню в офшорних умовах та його використання в промислових процесах із мінімізацією енергетичних втрат. У цьому контексті Україна має значний потенціал для розвитку енергоефективного водневого виробництва, використовуючи наявні відновлювані ресурси та сучасні технології. Тому дослідження в цій сфері сприятимуть впровадженню водневої економіки та інтеграції України у світовий ринок екологічно чистої енергетики.

Аналіз сучасних досліджень і публікацій засвідчує підвищений інтерес учених до технологічних аспектів інноваційного виробництва водню. Так, Карп І. зазначає, що парова конверсія вуглеводнів або вугілля є основною технологією виробництва водню, проте цей процес супроводжується значними викидами діоксиду вуглецю в атмосферу. Водень, отриманий таким методом, класифікується як «сірий» і не сприяє досягненню цілей безвуглецевої енергетики [1, с. 11]. Зі свого боку, Kuterbekov K., Kabyshev A., Bekmyrza K., Kubenova M., Kabdrakhimova G., Ayalew A. зауважують, що сучасні інноваційні підходи до виробництва водню спрямовані на підвищення енергоефективності та екологічної стійкості технологічних процесів. На думку вчених, високотемпературний електроліз передбачає електроліз водяної пари при температурах понад 700°C за допомогою твердоокисневих електролізних комірок, що дозволяє ефективніше використовувати енергію та залучати вторинне тепло. Водночас плазмовий риформінг використовує плазмові технології для перетворення вуглеводнів або біомаси на водень із мінімальним викидом вуглецю, що робить його ефективним для місцевого виробництва водню та переробки відходів в енергію. Метод термохімічного розщеплення води базується на хімічних реакціях, що дозволяють отримувати водень із води за допомогою високотемпературного тепла, зокрема від сонячної енергії, що підвищує масштабованість процесу, а мікробний електроліз використовує здатність мікроорганізмів розщеплювати органічну матерію з виділенням водню, що є ефективним методом децентралізованого виробництва, особливо у системах очищення стічних вод. Кожен із цих методів, з позиції науковців, має свої переваги: високотемпературний електроліз підходить для промислового використання, плазмовий риформінг зменшує вуглецевий слід, термохімічний процес є перспективним для використання відновлюваних джерел енергії, а мікробний електроліз забезпечує екологічне перетворення органічних відходів [2]. Поряд з тим, Alinejad Z., Parham N., Tawalbeh M., Al-Othman A., Almomani F. стверджують, що виробництво водню здійснюється за різними технологічними підходами, які визначають його тип – сірий, синій або зелений – залежно від рівня викидів CO₂ та використання відновлюваних джерел енергії. Найбільш поширеним методом є виробництво сірого водню, що супроводжується значними викидами CO₂ і базується на конверсії викопного палива, зокрема паровому риформінгу. Водень, отриманий із викопних джерел із подальшим уловлюванням або перетворенням викидів CO₂, класифікується як синій [3]. Натомість Nyangon J., Darekar A. підкреслюють, що водневі технології відіграють ключову роль у процесі декарбонізації капіталомістких галузей, таких як транспорт, енергетика та хімічна промисловість, завдяки їх широкому спектру застосувань та поступовому зниженню капітальних витрат. У транспортному секторі водневі паливні елементи забезпечують нульові викиди, значний запас ходу та швидке заправлення, що робить їх конкурентоспроможною альтернативою традиційним електромобілям. В енергетичній сфері водень виступає ефективним акумулятором, сприяючи балансуванню відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна та вітрова енергетика, шляхом накопичення надлишкової електроенергії [4]. Крім того, Пилипенко В., Ночніченко І., Луговський О. та Костюк Д., досліджуючи процеси виробництва водню із застосуванням модуля ультразвукового розпилювача в методі високотемпературного електролізу водяної пари, відзначають, що цей метод має значні переваги, зокрема мінімальні втрати опору та відсутність перенапруження електролітом. Водень, отриманий таким способом, характеризується високою універсальністю, оскільки може зберігатися в газоподібному, рідкому стані або у вигляді гібридів металів, що легко дисоціюють, транспортуватися через газопроводи та танкери, а також слугувати джерелом енергії або сировини для подальшої переробки. Однак основним недоліком цього методу є значні капітальні витрати, необхідні для його реалізації. Додаткові технічні труднощі пов'язані з утворенням суміші водню та водяної пари, яка, втім, може бути ефективно розділена шляхом охолодження та конденсації. Окремим викликом залишається вибір матеріалів, здатних працювати в умовах високих температур, що є критичним аспектом для підвищення ефективності процесу [5, с. 294].

Аналіз зазначених джерел свідчить про те, що питання впровадження інновацій у контексті ефективного виробництва водню з практичної точки зору залишається недостатньо висвітленим.

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Метою наукової статті є аналіз та обґрунтування інноваційних рішень, спрямованих на підвищення енергоефективності виробництва водню, із визначенням перспектив їх впровадження в Україні.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Розвиток водневої енергетики є важливим етапом на шляху до сталого енергетичного майбутнього, зокрема у контексті переходу до відновлюваних джерел енергії. В Україні наявність значних природних ресурсів, таких як сонячна та вітрова енергія, створює можливості для впровадження інноваційних рішень у водневому виробництві. Однак процес виробництва водню залишається енергоємним, що підвищує важливість дослідження новітніх технологій для зниження енергетичних витрат та збільшення ефективності виробництва.

Враховуючи значний потенціал України у використанні відновлювальних джерел енергії, впровадження новітніх водневих технологій вимагає не лише покращення ефективності виробництва водню, а й подолання технічних та економічних бар'єрів. Інноваційні підходи в розробці електролізерів та новітні методи транспортування водню відкривають нові можливості для комерційного використання цієї енергоефективної технології. У контексті розвитку водневої економіки Україні варто звернути увагу на досвід глобальних лідерів, що вже демонструють ефективність застосування водню в промисловості та транспортуванні. Це дозволить не лише інтегрувати водень як енергоносію у національну енергетичну систему, а й сприятиме розвитку інфраструктури для зберігання і розподілу водню. Завдяки цьому Україна зможе скоротити свою залежність від традиційних енергоресурсів та зробити вагомий внесок у глобальні енергетичні трансформації.

Розвиток інновацій у сфері чистих енергетичних технологій є ключовим для впровадження водню в енергетичний перехід, що має велике значення для України. Водневі електролізери, зокрема лужні та протонно-обмінні мембрани (PEM), вже є комерційно доступними, а новітні розробки, наприклад, електролізер H2U Technologies потужністю 200 кВт без іридію, сприяють зниженню витрат на обладнання. Згідно з Global Hydrogen Review 2023 [6] у 2023 році компанії Sunfire (2,6 МВт) та Bloom Energy (4 МВт) ввели в експлуатацію найбільші демонстраційні твердооксидні електролізери (SOEC), що наближає цю технологію до комерційного використання. Важливим досягненням стало відкриття компанією Hysata нового заводу для виробництва електролізерів з лужним капілярним живленням, які мають ефективність до 95%. У сфері транспортування водню у 2023 році у світі розпочало роботу перше чисте водневе підземне сховище потужністю 3 ГВт·год. У промисловості запущено проект HyInHeat за участі 30 партнерів із 12 європейських країн, спрямований на демонстрацію використання водню у допоміжних процесах виробництва сталі та алюмінію. Водневий сектор також зазнає змін у сфері транспорту: у 2023 році в Норвегії почав курсувати перший у світі водневий пором, а MAN Energy Solutions провела успішне тестування двотактного двигуна на аміаку.

Інноваційні рішення для енергоефективного виробництва водню передбачають удосконалення технологій електролізу, альтернативні методи виробництва та інтеграцію відновлюваних джерел енергії. Зокрема, ключовими напрямками розвитку є підвищення ефективності електролізерів, зниження залежності від критичних матеріалів та збільшення терміну їх експлуатації. У Global Hydrogen Review 2024 [7], наприклад, зазначено, що у 2023 році компанія H2U Technologies випробувала іридієвий каталізатор із терміном служби 25000 годин, а Toshiba спільно з Bekaert розробила технологію, що зменшує використання іридію на 90%. Проект HYPRAE, що фінансується ЄС, з 2023 року працює над розробкою лужних електролізерів, здатних працювати під тиском 80-100 бар, що значно перевищує поточний рівень у 30 бар. У сфері офшорного виробництва водню проект Sealhyfe компанії Lhyfe успішно випробував 1 МВт електролізер на морській платформі, а європейський проект HOPE передбачає запуск 10 МВт офшорного заводу до 2026 року. У напрямі водневої енергетики з використанням вичопного палива з уловлюванням вуглецю (CCUS) перспективним є перехід від парового риформінгу метану до автотермічного риформінгу (ATR), що дозволяє досягти вищих рівнів уловлювання CO₂. Водночас у 2024 році проекти HyPES у Катарі та Hylios в Іспанії розпочали пілотні дослідження виробництва водню з відходів води за допомогою фотокаталітичного розщеплення.

Водень розглядається як паливо майбутнього, і за прогнозами Європейської Комісії, відповідно до «Водневої дорожньої карти», він може покрити до чверті енергетичних потреб ЄС до 2050 року. Наразі 96% водню виробляється з вичопного палива, що супроводжується значними викидами CO₂, тому перехід на відновлюваний водень є важливим кроком для досягнення кліматичної нейтральності. Відновлюваний водень отримується шляхом електролізу води, використовуючи електроенергію з відновлюваних джерел, що дозволяє значно скоротити викиди CO₂ в хімічній промисловості. Німецька компанія Evonik у співпраці з партнерами розробила інноваційну мембрану для електролізерів, яка підвищує ефективність виробництва водню. Ця мембрана з полімерного матеріалу діє як фільтр і роздільник, забезпечуючи проходження лише певних іонів, що сприяє утворенню водню без використання дорогіших металів. У межах проекту CHANNEL, що фінансується програмою Horizon 2020, планується створення та випробування електролізерної системи на основі цієї мембрани. Завдяки її конкурентним перевагам, таким як висока ефективність, низькі інвестиційні витрати та можливість вторинного використання, ця технологія може сприяти масштабному впровадженню водневої енергетики [8].

Для досягнення цілей щодо масштабного впровадження водневої енергетики, важливим є не лише розвиток новітніх технологій виробництва водню, але й активне залучення відновлювальних джерел енергії,

що забезпечують сталість і низький вуглецевий слід. У цьому контексті електроліз, як метод отримання водню, потребує подальшого удосконалення для досягнення більшої ефективності та зменшення використання дорожчих металів. Інновації у сфері мембранних технологій, таких як розробка мембрани для електролізерів компанією Evonik, відкривають нові можливості для безпечного та економічного виробництва водню без використання традиційних, дорогих матеріалів. Програми, наприклад, CHANNEL, що реалізуються в рамках Horizon 2020, можуть стати важливим поштовхом для інтеграції подібних технологій у виробничі процеси в Україні. Завдяки подібним інноваційним рішенням, Україна має потенціал не лише знизити енергетичні витрати, але й стати частиною глобальної водневої економіки, забезпечуючи більш чисте і ефективне енергетичне виробництво. Враховуючи наявність значних природних ресурсів для виробництва відновлюваної енергії, ці технології можуть стати основою для створення нових галузей та покращення екологічної ситуації в Україні. Тому впровадження інноваційних рішень в енергетичний сектор стає важливим стратегічним кроком у досягненні кліматичних та економічних цілей країни.

HORIZON-JTI-CLEANH2-2024-02-04 є важливим проектом у межах програми HORIZON JU Innovation Actions, спрямованим на демонстрацію інноваційних рішень у сфері компресійних технологій для виробництва, зберігання та транспортування водню. Реалізація цього проекту сприятиме зміцненню європейського лідерства у розбудові водневої інфраструктури, зокрема для транспорту, промислового використання та газових мереж. Одним із ключових завдань є розробка ефективних компресорних технологій, що дозволять знизити витрати виробництва зеленого водню, підвищити енергоефективність і надійність систем. Очікується, що результати досліджень сприятимуть створенню повномасштабного демонстратора проривного компресора до 2027 року, а також його подальшій реплікації на щонайменше п'яти інших локаціях до 2030 року. Важливою метою є зниження експлуатаційних витрат компресорних систем і забезпечення їхньої довговічності, зокрема збільшення терміну служби до 20 років та підвищення середнього часу безвідмовної роботи до 60000 годин. У межах проекту передбачено 24-місячну демонстрацію компресійних рішень у реальних комерційних умовах із використанням відновлюваної енергії. Особливий акцент зроблено на екологічних аспектах, зокрема можливості використання компресорів у складних кліматичних умовах, на морських платформах, у гірських регіонах та віддалених районах [9].

Розвиток водневої енергетики в Україні потребує не тільки вдосконалення технологій виробництва водню, але й інтеграції інноваційних рішень у різні сфери енергетичної інфраструктури. Важливими кроками у цьому напрямку є підтримка проектів, що сприяють розробці новітніх компресійних технологій для зберігання та транспортування водню, таких як HORIZON-JTI-CLEANH2-2024-02-04. Цей проект може стати важливим етапом у формуванні ефективних рішень для зниження витрат на виробництво і транспортування зеленого водню, що безпосередньо вплине на енергетичну ефективність України. Інтеграція таких технологій забезпечить сталість водневої інфраструктури та сприятиме зменшенню викидів вуглецю, що відповідає європейським стандартам і вимогам. Крім того, реалізація цих інновацій створить можливості для розвитку нових галузей в Україні, що дозволить країні посилити своє становище на європейському ринку водневої енергетики.

Варто зауважити, що Європейський фонд інновацій виділив гранти на суму 4,8 мільярда євро для 85 інноваційних проектів, третина з яких спрямована на розвиток водневих технологій. Це найбільше фінансування з моменту створення фонду у 2020 році, що збільшило загальну підтримку до 12 мільярдів євро та розширило кількість проектів на 70%. Значна частина коштів буде спрямована на впровадження електролізерів різних технологій, зокрема PEM, SOEC, AEM, а також на проекти зі зберігання водню, що дозволить збільшити загальну потужність електролізерів до 9,3 ГВт. Крім того, фінансування сприятиме виробництву 61 кілотонни RFNBO-водню на рік, що дозволить збільшити загальні обсяги підтримуваного фонду виробництва до 631,5 кілотонни [10].

Україна має значний потенціал у сфері виробництва водню завдяки наявності відновлюваних джерел енергії, і підтримка з боку ЄС може прискорити впровадження інноваційних рішень для його енергоефективного виробництва. У рамках ініціативи REPowerEU передбачено активізацію використання відновлюваного водню для зменшення залежності від ископного палива, що особливо актуально для України в умовах війни та післявоєнного відновлення. Програма Horizon Europe та партнерство Clean Hydrogen сприяють розробці передових технологій для зниження вартості та масштабування виробництва водню. Важливу роль відіграє також Європейський водневий банк, який підтримує створення ринку водню та залучення інвестицій. Україна може скористатися можливостями співпраці в межах SET Plan та ERA Pilot on Green Hydrogen, що сприятиме розширенню дослідницьких проектів у сфері водневої енергетики. Одним із перспективних напрямів є створення водневих долин, що вже підтримуються Коштом згуртованості (Cohesion Fund) та Connecting Europe Facility. Особливо актуальним є проект GreenHyScale, що дозволяє тестувати масштабне виробництво водню на основі електролізерів. Українські університети та навчальні заклади можуть долучитися до ініціативи European Hydrogen Academy та проекту GreenSkills4H2, які сприяють підготовці спеціалістів у водневій економіці. Важливим аспектом також є співпраця України з ЄС у межах міжнародної ініціативи Mission Innovation – Clean Hydrogen Mission, яка спрямована на ідентифікацію та розвиток водневих долин у всьому світі. Окрім того, передбачається розробка інструменту

для оцінки потенціалу виробництва водню в Україні та можливостей його експорту до ЄС, що стане важливим кроком для інтеграції країни в європейський водневий ринок [11].

З огляду на зазначене вище, зауважимо, що розвиток водневої економіки в Україні безпосередньо пов'язаний із європейськими ініціативами та фінансовою підтримкою, що відкриває нові можливості для інновацій в енергетичній сфері. Європейський фонд інновацій, що виділив гранти на розвиток водневих технологій, став важливим чинником у формуванні конкурентоспроможних водневих ринків, що сприяє зменшенню вуглецевих викидів. Враховуючи потенціал України у виробництві відновлювальної енергії, фінансова підтримка з боку ЄС може стати основою для впровадження новітніх технологій електролізу та створення потужної водневої інфраструктури в країні. Ініціативи, такі як REPowerEU та Horizon Europe, є платформами для спільної роботи над зниженням вартості виробництва водню та його інтеграції в енергетичні системи країн ЄС, що відкриває можливості для співпраці з Україною. Крім того, створення водневих долин в Україні, як частина програм Cohesion Fund та Connecting Europe Facility, дозволить реалізувати масштабні проекти, що сприятимуть економічному розвитку та технологічному прогресу в галузі. Спільні зусилля України та ЄС у рамках програми Clean Hydrogen можуть також забезпечити країні доступ до передових технологій з виробництва, зберігання та транспортування водню. Важливою складовою є й участь українських науково-дослідних установ у ініціативах European Hydrogen Academy та GreenSkills4H₂, які сприяють підготовці кваліфікованих кадрів у водневій сфері. Крім того, партнерство з міжнародними проектами, такими як Mission Innovation, дозволяє Україні долучитися до глобальних процесів розвитку водневої економіки. Все це створює умови для розвитку ефективного ринку водню в Україні та її інтеграції до європейських енергетичних мереж, що стане важливим етапом у забезпеченні енергетичної безпеки країни.

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

Підсумовуючи, зазначимо, що воднева енергетика є важливим напрямом для досягнення сталого енергетичного майбутнього України, особливо в контексті переходу до відновлюваних джерел енергії. Інноваційні технології, зокрема в сфері електролізерів і транспортування водню, мають потенціал значно підвищити ефективність виробництва водню і знизити витрати енергії. Враховуючи значні природні ресурси України, такі як сонячна та вітрова енергія, є можливості для розширення водневої економіки через інтеграцію відновлювальних джерел енергії. Ключовими завданнями є вдосконалення технологій виробництва водню, зменшення залежності від критичних матеріалів і підвищення терміну експлуатації електролізерів. Розвиток інновацій у сфері мембранних технологій та компресійних рішень для транспортування водню також сприятиме зниженню витрат та підвищенню енергоефективності. Інтеграція таких технологій в енергетичну інфраструктуру України дозволить знизити викиди CO₂ і сприяти сталому розвитку країни. Водночас реалізація проектів, таких як HORIZON-JTI-CLEANH₂-2024-02-04, буде важливим етапом на шляху до зміцнення водневої інфраструктури та інтеграції водневої енергетики в глобальну економіку.

Література

1. Карп І. М. Водень: властивості, виробництво та особливості використання. Електротехнології та ресурсозбереження. 2020. № 2. С. 4-14.
2. Kuterbekov K. A., Kabyshev A., Bekmyrza K., Kubenova M., Kabdrakhimova G., Ayalew A. T. Innovative approaches to scaling up hydrogen production and storage for renewable energy integration. *International Journal of Low-Carbon Technologies*. 2024. № 19. P. 2234-2248.
3. Alinejad Z., Parham N., Tawalbeh M., Al-Othman A., Almomani F. Progress in green hydrogen production and innovative materials for fuel cells: a pathway towards sustainable energy solutions. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.09.153>
4. Nyangon J., Darekar A. Advancements in hydrogen energy systems: A review of levelized costs, financial incentives and technological innovations. *Innovation and Green Development*. 2024. № 3(3). P. 100149.
5. Пилипенко В. В., Ночніченко І. В., Луговський О. Ф., Костюк Д. В. Виробництво водню із застосуванням модуля ультразвукового розпилювача в методі високотемпературного електролізу водяної пари. *Інновації молоді в машинобудуванні*. 2020. № 2. С. 291-295.
6. Global Hydrogen Review 2023. URL: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023>
7. Global Hydrogen Review 2024. URL: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024>
8. Scaling up renewable hydrogen production with an innovative membrane. URL: <https://cefic.org/a-solution-provider-for-sustainability/chemistrycan/going-climate-neutral/scaling-up-renewable-hydrogen-production-with-an-innovative-membrane/>
9. HORIZON-JTI-CLEANH₂-2024-02-04. Demonstration of innovative solutions for high-capacity, reliable, flexible, and sustainable hydrogen compression technologies in commercial applications. URL: <https://www.horizon-europe.gouv.fr/demonstration-innovative-solutions-high-capacity-reliable-flexible-and-sustainable-hydrogen-36558>

10. 2024 Innovation Fund grants: hydrogen projects account for 30% of total awards. URL: <https://hydrogeneurope.eu/2024-innovation-fund-grants-hydrogen-projects-account-for-30-of-total-awards/>
11. Hydrogen. How the EU supports hydrogen research. URL: https://research-and-innovation.ec.europa.eu/research-area/energy/hydrogen_en

References

1. Karp, I. M. (2020). *Hydrogen: Properties, Production, and Usage Features*. *Electrotechnologies and Resource Saving*, (2), 4–14.
2. Kuterbekov, K. A., Kabyshev, A., Bekmyrza, K., Kubenova, M., Kabdrakhimova, G., & Ayalew, A. T. (2024). Innovative Approaches to Scaling Up Hydrogen Production and Storage for Renewable Energy Integration. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 19, 2234–2248.
3. Alinejad, Z., Parham, N., Tawalbeh, M., Al-Othman, A., & Almomani, F. (2024). Progress in Green Hydrogen Production and Innovative Materials for Fuel Cells: A Pathway Towards Sustainable Energy Solutions. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.09.153>
4. Nyangon, J., & Darekar, A. (2024). Advancements in Hydrogen Energy Systems: A Review of Levelized Costs, Financial Incentives, and Technological Innovations. *Innovation and Green Development*, 3(3), 100149.
5. Pylypenko, V. V., Nochnichenko, I. V., Luhovskyi, O. F., & Kostiuk, D. V. (2020). Hydrogen Production Using an Ultrasonic Atomizer Module in the High-Temperature Steam Electrolysis Method. *Youth Innovations in Mechanical Engineering*, (2), 291–295.
6. *Global Hydrogen Review 2023*. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023>
7. *Global Hydrogen Review 2024*. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024>
8. *Scaling Up Renewable Hydrogen Production with an Innovative Membrane*. Retrieved from <https://cefic.org/a-solution-provider-for-sustainability/chemistrycan/going-climate-neutral/scaling-up-renewable-hydrogen-production-with-an-innovative-membrane/>
9. *HORIZON-JTI-CLEANH2-2024-02-04: Demonstration of Innovative Solutions for High-Capacity, Reliable, Flexible, and Sustainable Hydrogen Compression Technologies in Commercial Applications*. Retrieved from <https://www.horizon-europe.gouv.fr/demonstration-innovative-solutions-high-capacity-reliable-flexible-and-sustainable-hydrogen-36558>
10. *2024 Innovation Fund Grants: Hydrogen Projects Account for 30% of Total Awards*. Retrieved from <https://hydrogeneurope.eu/2024-innovation-fund-grants-hydrogen-projects-account-for-30-of-total-awards/>
12. *Hydrogen: How the EU Supports Hydrogen Research*. Retrieved from https://research-and-innovation.ec.europa.eu/research-area/energy/hydrogen_en