

УДК 338.3(65.01):330.33

Козик Василь Васильович

*кандидат економічних наук, професор,
завідувач кафедри економіки підприємства та інвестицій
Національний університет «Львівська політехніка»*

Козык Василий Васильевич

*кандидат экономических наук, профессор,
заведующий кафедрой экономики предприятия и инвестиций
Национальный университет «Львовская политехника»*

Kozyk Vasyl

*PhD, Professor,
Head of the Department of Business Economics and Investment
Lviv Polytechnic National University
ORCID: 0000-0003-4204-6026*

Мрихіна Олександра Борисівна

*доктор економічних наук, професор
Національний університет «Львівська політехніка»*

Мрыхина Александра Борисовна

*доктор экономических наук, профессор
Национальный университет «Львовская политехника»*

Mrykhina Oleksandra

*Doctor of Economic Sciences, Professor
Lviv Polytechnic National University
ORCID: 0000-0002-0567-2995*

Данилович Тарас Богданович

*кандидат економічних наук, доцент
Національний університет «Львівська політехніка»*

Данилович Тарас Богданович

кандидат экономических наук, доцент

Национальный университет «Львовская политехника»

Danylovych Taras

PhD, Associate Professor

Lviv Polytechnic National University

ORCID: 0000-0003-3316-4856

Стеців Ирина Семенівна

кандидат економічних наук, доцент

Національний університет «Львівська політехніка»

Стецив Ирина Семеновна

кандидат экономических наук, доцент

Национальный университет «Львовская политехника»

Stetsiv Iryna

PhD, Associate Professor

Lviv Polytechnic National University

ORCID: 0000-0003-4982-1355

Подольчак Назар Юрійович

доктор економічних наук, професор,

завідувач кафедри адміністративного та фінансового менеджменту

Національний університет «Львівська політехніка»

Подольчак Назар Юрьевич

доктор экономических наук, профессор, заведующий кафедрой

административного и финансового менеджмента

Национальный университет «Львовская политехника»

Podolchak Nazar

*Doctor of Economic Sciences, Professor,
Head of the Department of Administrative and Financial Management
Lviv Polytechnic National University
ORCID: 0000-0002-0284-9601*

Гавриляк Анатолій Степанович

*кандидат технічних наук, доцент
Національний університет «Львівська політехніка»*

Гавриляк Анатолій Степанович

*кандидат технических наук, доцент
Национальный университет «Львовская политехника»*

Havryliak Anatolii

*PhD, Associate Professor
Lviv Polytechnic National University
ORCID: 0000-0003-1389-2784*

**ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ВОДНЕВИХ ТЕХНОЛОГІЙ В
УКРАЇНІ (НА ПРИКЛАДІ ВИРОБНИЦТВА ЕЛЕКТРОЛІЗЕРІВ)
ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ВОДОРОДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В
УКРАИНЕ (НА ПРИМЕРЕ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОЛИЗЕРОВ)
PROSPECTS FOR THE APPLICATION OF HYDROGEN
TECHNOLOGIES IN UKRAINE (ON THE EXAMPLE OF
ELECTROLYZER MANUFACTURING)**

Анотація. Визначено, що використання відновлюваних джерел енергії, як один з головних принципів реалізації моделі циркулярної економіки, нині є пріоритетним вектором розвитку європейської й української енергетики, в якій чільне місце належить гідроенергетиці. У структурі основних джерел виробництва гідроенергетики перспективним

і доцільним з екологічної та економічної позицій вважають водень, який може застосовуватися як в якості енергоносія, так і бути використаний для сезонного зберігання енергії, або як «зелене» паливо для транспортних засобів. Одним з найефективніших сучасних способів його виробництва є електролізери. Досліджено сучасний стан та перспективи застосування водневих технологій, місце перспективних вітчизняних моделей електролізерів на ринку світових аналогів. Проаналізовано електролізер на основі твердополімерного електроліту, створений у Науковому парку «SID City» при Національному університеті «Львівська політехніка». Пропонований електролізер характеризується низкою параметрів, що засвідчують покращені техніко-економічні характеристики пристрою (високий ККД електролізу води, низький рівень викидів вуглецю, надійність й енергоощадність результатів роботи, відсутність потреби використовувати хімічні речовини для розщеплення води на водень та кисень, універсальність тощо), а також дає змогу знизити собівартість продукції, виготовленої із його застосуванням у виробничому процесі. Він може використовуватися у різних сферах промисловості, медицині, побуті тощо. Обґрунтовано, що поширення таких електролізерів сприятиме стимулюванню розвитку виробництва водневої енергетики у регіоні та країні, підвищить ефективність діяльності суб'єктів, які його застосовують.

Ключові слова: водневі технології, електролізер, інноваційний розвиток, циркулярна економіка.

Анотація. *Определено, что использование возобновляемых источников энергии, как один из главных принципов реализации модели циркулярной экономики, в настоящее время является приоритетным вектором развития европейской и украинской энергетики, в которой ведущее место принадлежит гидроэнергетике. В структуре основных*

источников производства гидроэнергетики перспективным и целесообразным с экологической и экономической позиций считают водород, который может применяться как в качестве энергоносителя, так и использоваться для сезонного хранения энергии, или как «зеленое» топливо для транспортных средств. Одним из наиболее эффективных современных способов его производства являются электролизеры. Исследованы современное состояние и перспективы применения водородных технологий, место перспективных отечественных моделей электролизеров на рынке мировых аналогов. Проанализирован электролизер на основе твердополимерного электролита, созданный в Научном парке «SID City» при Национальном университете «Львовская политехника». Предлагаемый электролизер характеризуется рядом параметров, подтверждающих улучшенные технико-экономические характеристики устройства (высокий КПД электролиза воды, низкий уровень выбросов углерода, надежность и энергосберегаемость результатов работы, отсутствие необходимости использовать химические вещества для расщепления воды на водород и кислород, универсальность и т. п.), а также дает возможность снизить себестоимость продукции, изготовленной с его применением в производственном процессе. Он может использоваться в разных сферах промышленности, медицине, быту и т.д. Обосновано, что распространение таких электролизеров будет способствовать стимулированию развития производства водородной энергетики в регионе и стране, повысит эффективность деятельности применяемых субъектов.

Ключевые слова: *водородные технологии, электролизер, инновационное развитие, циркулярная экономика.*

Summary. *The article notes the using of renewable energy sources, as one of the main principles of the circular economy model, is now a priority vector for*

the development of European and Ukrainian energy, in which the leading place belongs to hydropower. Promising and appropriate from an environmental and economic standpoint is hydrogen in the structure of the main sources of hydropower production. It can be used both as an energy source and to be used for seasonal energy storage, or as a "green" fuel for vehicles. One of the most effective modern methods of its production is electrolyzers. The current state and prospects of application of hydrogen technologies, the place of perspective domestic models of electrolyzers on the world market of analogues are investigated. An electrolyzer based on a solid polymer electrolyte created at the Scientific Park "SID City" of Lviv Polytechnic National University was analyzed. The proposed electrolyzer is characterized by a number of parameters that indicate improved technical and economic characteristics of the device (high efficiency of water electrolysis, low carbon emissions, reliability and energy efficiency, no need to use chemicals to split water into hydrogen and oxygen, versatility, etc.), and allows you to reduce the cost of products manufactured with its use in the production process. It can be used in various fields of industry, medicine, everyday life, etc. The article substantiates the proliferation of such electrolyzers will stimulate the development of hydrogen energy production in the region and the country, increase the efficiency of entities that use it.

Key words: *hydrogen technologies, electrolyzer, innovative development, circular economy.*

Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Суттєве збільшення в останні роки у світі обсягів відходів і викидів, зумовлених надмірним рівнем споживання і виробництва, на фоні проблем скорочення природних ресурсів, зумовило запровадження циркулярної економіки на зміну лінійної моделі її розвитку. На відміну від традиційного ланцюжка «виробити – використати – утилізувати», провідні компанії обирають курс

на скорочення кількості витраченої сировини й матеріалів, віддаючи перевагу відновлюваним ресурсам. При цьому, спостерігається намагання підвищити рівень економічної, екологічної та соціальної ефективності використання продуктів, задіяти побічні продукти у подальшому виробництві, що дає змогу в загальному процесі генерування доданої вартості знизити рівень залежності виробників від нових видів сировини та мінімізувати негативний вплив на довкілля.

Використання відновлюваних джерел енергії, як один з головних принципів реалізації моделі циркулярної економіки, нині є пріоритетним вектором розвитку європейської енергетики. У структурі застосування відновлюваних джерел енергії в країнах ЄС 16,0 % припадає на гідроенергетику [1], з-поміж основних джерел виробництва якої доцільним з екологічної та економічної позицій вважається водень. При цьому, він може застосовуватися як в якості енергоносія, так і бути використаний для сезонного зберігання енергії, або як «зелене» паливо для транспортних засобів.

В Україні, за проєктом «Нової енергетичної стратегії України до 2035 року: Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» [3], частка відновлюваних джерел енергії у її кінцевому споживанні у 2020 р. становила 8 % (із урахуванням всієї гідроенергетики країни), що понад утричі нижче за середнє значення даного показника у країнах ЄС – 28 %. При цьому, близько 20 % енергії з відновлюваних джерел було згенеровано ГЕС, які стабільно працюють упродовж багатьох десятиліть на р. Дніпро. Водночас, близько 30 % енергії з відновлювальних джерел отримують з продуктів біологічного походження, а проблемі застосування водневих технологій не надається належного значення. Увага приділяється здебільшого виробництву водню, а не розширенню сфер його можливого подальшого використання. В цілому, така ситуація вимагає розроблення цільових індикаторів частки відновлюваних джерел енергії у валовому кінцевому її

споживанні. Вбачаючи перспективу застосування водневих технологій, у лютому 2018 року було створено Енергетичну асоціацію «Українська Воднева Рада» — єдину національну водневу асоціацію провідних енергетичних, промислових та публічних компаній, метою якої є забезпечення умов для глобального переходу економіки України на водневу енергетику на принципах сталого розвитку.

Перспективність розвитку водневої енергетики актуалізує створення сучасних виробництв, основними з яких у практиці технологічно провідних країн світу є електролізери. За аналітичними даними [4], у 2019 р. світовий ринок електролізерів оцінювали у 0,2 млрд. дол. США. Очікують, що до 2027 р. він зросте до 0,9 млрд. дол. США. Загалом, від 2021 до 2030 рр. зростання CAGR складе понад 30,0 %.

У країнах ЄС з 2020 по 2024 рр. для виробництва водню заплановано встановити електролізери загальною потужністю не менше 6 ГВт, що забезпечить виробництво до 1 млн. тонн водню на рік; з 2025 по 2030 рр. очікується доведення потужності електролізерів до рівня 40 ГВт, а річного виробництва водню — до 10 млн. тонн [2, с. 2]. Прогнозовано, що водень застосовуватиметься як засіб добового та сезонного збалансування електроенергетичної системи, яка базується на відновлюваних джерелах енергії. До 2050 р. близько 20 % електроенергії з відновлюваних джерел може бути використано для виробництва «зеленого» водню, за рахунок якого буде забезпечено до 24 % світової потреби в енергоресурсах, а його щорічні продажі складуть 630 млрд. євро [2, с. 2].

Підвищення сучасних вимог до диверсифікації джерел енергії та палива, зумовлене необхідністю дотримання екологічної безпеки, веде до розширення пов'язаних з нею інноваційних інфраструктур, де з'являється усе більше нових суб'єктів, які замінюють традиційне паливо на водень, що, своєю чергою, стимулює зростання ринкової частки виробництва електролізерів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і на які спирається автор. Теоретичні та прикладні проблеми розвитку водневої енергетики розглядаються багатьма сучасними науковцями і практикаками, зокрема, у роботах [5-8]. Особливості і характеристики водневих технологій та прикладного застосування електролізерів запропоновано вченими і практикаками в [9-11]. Окремі напрацювання з питань провадження економіки замкненого циклу наведено у наукових статтях [12; 13] тощо.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Незважаючи на широке коло робіт у сфері водневої енергетики, вчені недостатньо уваги приділяють практиці застосування водневих технологій, аналізуванню нових розробок, оцінюванню їхніх переваг та недоліків, дослідженню світового досвіду з їх застосування, комерціалізації та виведення на ринок. Дослідження водневих технологій має базуватися на комплексі властивостей, пов'язаних як з особливостями галузі, так і з техніко-технологічними характеристиками новітніх технологій, які визначають характер поступу ринку водневої енергетики.

Формулювання цілей статті. *Мета статті* – розглянути сучасний стан та перспективи застосування водневих технологій, місце пропонованих вітчизняних моделей електролізерів на ринку світових аналогів.

Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів. Станом на кінець 2021 р. у світі споживали 75 млн тонн водню (переважно в галузі нафтопереробки та виробництва аміаку), з яких близько 3/4 вироблено з понад 205 млрд м куб. природного газу [12]. Майже весь обсяг іншого водню отримували з вугілля. Лише 0,1 % (100 тис. тонн) вироблено за допомогою електролізу, тобто без використання викопних вуглеводнів. За прогнозними даними [12], у 2022 р. сумарна потужність запущених нових електролізерів

для отримання водню зросте у декілька разів в усьому світі, хоча і складе тільки 120 МВт потужності. Вже в найближчі роки у Європі може статися справжній прорив, спричинений реалізацією «Водневої стратегії ЄС» [12]. Очікується, що вона сприятиме зниженню залежності Європи від викопних джерел енергії, скоротить на 50 % рівень викидів вуглекислого газу в атмосферу і суттєво здешевить вартість палива та енергоносіїв. Український уряд нині веде активну роботу над національною водневою стратегією.

Важливою частиною водневої стратегії ЄС є співробітництво на міжнародному рівні. ЄС має намір розвивати взаємодію з виробництва «зеленого» водню з сусідніми країнами і регіонами, щоб сприяти їхньому переходу до чистої енергії та сталого розвитку. За оцінками Єврокомісії, до 2030 р. в країнах Східного та Південного партнерств потенційно можна буде встановити електролізери для виробництва водню загальною потужністю 40 ГВт [2, с. 2]

«Зеленим» воднем прийнято називати такий, що відповідає граничному рівню з низьким вмістом вуглецю, утворюється на основі сонячної або вітрової енергії. З позицій покращення кліматичної ситуації, це ефективний варіант, у порівнянні із можливими іншими технологіями його перероблення. Кліматична спільнота світу зазначає, що «зелений» водень є основою для кліматично нейтрального майбутнього. Однак, для його виробництва необхідно використовувати істотну кількість високоякісної води, електроенергію та електролізери. Головним фактором, що визначає вартість «зеленого» водню, є електроенергія для його виробництва, а також ціна електролізерів, яка досі є значною. Для поширення «зелених» водневих технологій існує низка проблем, зумовлених необхідністю створення нової інфраструктури.

За даними [2, с. 3], вартість «зеленого» водню складає від 2,5 до 6 дол. США за кг і визначається вартістю електроенергії, яка в різних країнах складає від 20 – 70 дол. США за МВт. «Зелений» водень набуває

конкурентоспроможності лише в діапазоні цін на електроенергію від 30 до 45 дол. США за МВт (3 – 4,5 цента за кВт · год). Якщо ж порівняти конкурентну ціну електроенергії для електролізерів із ціною «зеленого» кіловату в Україні (від 15 центів для СЕС та від 11,5 центів для ВЕС без ПДВ та надбавки до «зелених» тарифів за дотримання рівня використання обладнання українського виробництва), то стає очевидним, що в Україні «зелений» водень може не мати конкурентних позицій практично до 2030 р.

Світовий досвід засвідчує ефективність використання електролізерів у сферах виробництва електроенергії, транспорту, промислової енергетики, будівництва тощо. Наявні на ринку електролізери здебільшого мають промислове застосування та характеризуються невисоким ККД, що не викликає до них комерційного інтересу, оскільки експлуатаційні витрати перевищують результативність, яку можна отримати за допомогою їх використання. Вивести цей пристрій на новий рівень застосування, зокрема, у важливих сферах життєдіяльності людей можливо за рахунок зміни елементів електролізера та удосконалення його конструктивних та експлуатаційних характеристик.

За оцінками європейських експертів, загальне виробництво водню у 2030 р. очікується на рівні 4,4 млн тонн, що еквівалентно 173 ТВт · год, або 25 % від загального попиту на водень в ЄС (665 ТВт · год) [13].

У зарубіжній та вітчизняній практиці нині використовують електролізери, що принципово відрізняються методами електролізу, які можуть визначати їхнє призначення. На рис. 1 наведені різні схеми та вказані особливості здійснення електролізу. Проведеними нами дослідженнями встановлено високу ефективність застосування полімерних електролітних мембранних електролізерів.

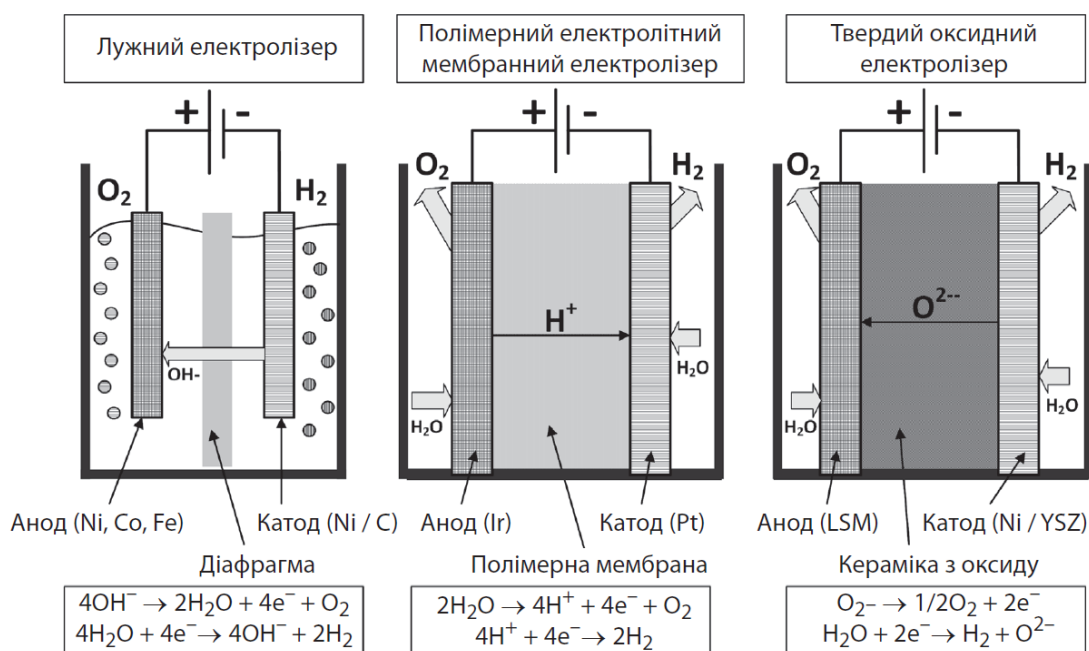


Рис. 1. Принципи здійснення лужного, PEM і SOE електролізу [13; 14]

У Національному університеті «Львівська політехніка» виконується інноваційний проєкт «Розроблення електролізера з твердополімерним електролітом» за «Програмою сприяння інноваційному та науково-технологічному розвитку у Львівській області на 2021 – 2025» у межах Наукового парку «SID Sity» Львівської політехніки. У проєкті запропоновано розробити електролізер із твердополімерним електролітом для електролізу води з метою отримання чистого водню та кисню без застосування хімічних речовин. Нині на ринку наявні електролізери принципово інших типів і конструкцій, однак вони не забезпечують такого рівня екологічності, як пропонується пристрій. Електроенергія електролізера подається на анод і катод через протонобмінну мембрану, що зумовлює розщеплення води на складові молекули – водень та кисень, які, завдяки застосованому твердополімерному електроліту, характеризуються високим рівнем очищення та цінні для подальшого застосування.

На відміну від існуючих на світовому ринку, пропоновані розробниками проєкту електролізери, на основі твердополімерного електроліту, мають покращені техніко-економічні параметри, зокрема:

- високий ККД електролізу води;
- низький рівень викидів вуглецю;
- доступність та зручність застосування у виробничому процесі;
- відсутність потреби використовувати хімічні речовини для розщеплення води на водень та кисень, що сприяє отриманню максимально чистого газу;
- надійність й енергоощадність отримуваних при роботі електролізера результатів;
- можливості створення електролізерів для генерування кисню і водню із заданими характеристиками продуктивності та тиску;
- універсальність електролізера;
- зниження суб'єктами господарювання собівартості продукції, виготовленої із застосуванням у виробничому процесі електролізера з твердополімерним електролітом тощо.

Унікальними характеристиками пропонованого електролізера є можливість досягнення високого ККД електролізу води, що сприятиме підвищенню рівня ресурсоощадності та ефективності її використання у подальших процесах. Водень не виділяє вуглекислий газ при спалюванні, що призводить до зменшення наземного випромінювання та збільшення енергоефективності. Наприклад, отриманий на основі електролізера кисень (350 мл кисню/хв.), є чистішим, порівняно із отриманим в інших умовах. Він може бути використаний в апаратах штучної вентиляції легень, штучного дихання для хворих на коронавірусну хворобу. Споживання отриманої за допомогою електролізера водневої води дає змогу людині краще засвоювати мінерали і вітаміни, їжу та інші природні речовини. Чистий водень,

генерований електролізером (потужність – 300 мл водню/хв.), є екологічним засобом для заправлення транспортних засобів (велосипеди, моторолери тощо). Розроблений електролізер може бути ефективним і для опалення великих площ приміщень (один електролізер може ефективно опалити понад 560 м² площі висотою 2,5 м). Розроблений електролізер є дешевшим від імпорتنих аналогів на 18 – 32 %.

У регіональному розрізі, електролізери нині популярні у країнах Північної Америки, Європі, Азіатсько-Тихоокеанському регіоні та частково ЛАМЕА (Південна (Латинська) Америка, Близький Схід та Африка). Ключовими гравцями на ринку електролізерів є: Hydrogenics, Nel ASA, Siemens Energy Global GmbH, Co. KG. AG, Toshiba, Air Liquide, Plug Power, McPhy Energy, ITM Power, Idroenergy, Next Hydrogen й інші. Однак, продукція цих та інших компаній, порівняно із пропонованими електролізерами, за подібних технічних характеристик є значно дорожчою та вимагає суттєвих експлуатаційних витрат. На даний час в Україні немає виробників електролізерів з твердополімерним електролітом, а більшість діючих підприємств не в змозі закупляти продукцію іноземних фірм. Це засвідчує актуальність та інноваційність пропонованого продукту, доцільність його виробництва і поширення в Україні.

Розроблення та дослідження характеристик вищезначеного проєкту здійснюється у Науковому парку «SID Sity» Львівської політехніки, який є платформою для зустрічей підприємців, обміну досвідом між ними, представлення товарів і послуг виробників, дає змогу реалізувати можливості нових бізнес-проєктів, стартапів тощо і має практику підготовки інноваційних проєктів. Він може стати зв'язуючою ланкою між розробниками та користувачами електролізерів у різних видах діяльності. Застосовуючи можливості своєї екосистеми, Науковий парк даватиме змогу проводити дослідження з удосконалення електролізерів, оперативно і цільово розповсюдити їх в регіоні. Прогнозовано, що пропоновані проєктом

електролізери, завдяки своїм унікальним характеристикам, стрімко поширюватимуться з розвитком технологічного прогресу.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямку. Нині воднева енергетика забезпечує так званий «запас» до того часу, поки від викопного палива доведеться остаточно відмовитися, а відновлювані джерела енергії не зможуть покривати потреби людства. З подоланням технологічних бар'єрів, воднева енергетика вийде на новий рівень і займе провідні позиції серед інших видів енергії.

Розроблений на основі твердополімерного електроліту електролізер, завдяки своїм характеристикам (високий ККД електролізу води, низький рівень викидів вуглецю; надійність й енергоощадність результатів, універсальність, відсутність потреби використовувати хімічні речовини для розщеплення води на водень та кисень тощо) може посісти чільне місце на вітчизняному та світовому ринках. Застосування цього електролізера дає змогу знизити собівартість продукції, виготовленої у виробничому процесі. Перспективним місцем виробництва таких електролізерів є Науковий парк «SID City» Львівської політехніки, що забезпечуватиме високу наукоємність даного приладу, можливість використовувати виробництво як навчальний полігон сучасних технологій для підготовки фахівців інженерних спеціальностей та сприятиме реалізації «Стратегії розвитку Львівської області на період 2021-2027 років».

Література

1. ПрАТ «Укргідроенерго». URL: <https://uhe.gov.ua/>
2. Бобро Д. Г. Проблемні питання та перспективи розвитку водневої енергетики в Україні // Національний Інститут стратегічних досліджень. URL: <https://niss.gov.ua/sites/default/files/2021-03/voden.pdf>

3. Нова енергетична стратегія України до 2035 року: «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність». URL: <http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/doccatalog/document?id=245213112>
4. Electrolyzer Market Size by Product. URL: <https://www.gminsights.com/industry-analysis/electrolyzer-market>
5. Motazed K., Salkuyeh Y. K., Laurenzi I. J., MacLean H. L., Bergerson J. A. Economic and environmental competitiveness of high temperature electrolysis for hydrogen production // International Journal of Hydrogen Energy. 2021. № 46 (41). P. 21274-21288. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.03.226>
6. Козик В. В., Мрихіна О. Б., Данилович Т. Б., Стеців І. С., Гавриляк А. С., Мельник В. М. Застосування водневих технологій для забезпечення європейських стандартів експлуатації автотранспорту // Міжнародний науковий журнал «Інтернаука». Серія: «Економічні науки». 2021. № 11. doi: <https://doi.org/10.25313/2520-2294-2021-11-7694>
7. Znak Z. O., Mertsalo I. P., Bukliv R. L. Electrochemical Characteristics of Acid Solutions of Spent Saline Chemical Current Sources // Materials Science. 2018. № 53 (6). P. 805-810.
8. Григорчак І. І., Костробій П. П., Стасюк І. В., Токарчук М. В., Величко О. В., Івацішин Ф. О., Маркович Б. М. Фізичні процеси та їх мікроскопічні моделі в періодичних неорганічно/органічних клатратах: Монографія. Львів: Видавництво Растр–7, 2015. 286 с.
9. Kong L., Li L., Cai G., Liu C., Ma P., Bian Y., Ma T. Techno-economic analysis of hydrogen energy for renewable energy power smoothing // International Journal of Hydrogen Energy. 2021. № 46 (3). P. 2847-2861. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.07.231>
10. Cao Y., Hani E. H. B., Mansir I. B., Diyoke C., Dhahad H. A. Exergy and exergo-economic investigation of a novel hydrogen production and storage

- system via an integrated energy system // International Journal of Hydrogen Energy. 2021. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.10.121>
11. Boretti A. There are hydrogen production pathways with better than green hydrogen economic and environmental costs // International Journal of Hydrogen Energy. 2021. № 46 (46). P. 23988-23995. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.04.182>
12. Перспективи використання водню та роль України в Європейській водневій енергетичній революції. URL: http://www.atomforum.org.ua/publications/articles/2020/perspektivi_vikoristannya_vodnyu_ta_rol_ukrayini_v_yevropejskij_vodnevij_energetichnij_r-evolyuciyi
13. Тащєєв 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.
14. Sapountzi F. M. et al. Electrocatalysts for the generation of hydrogen, oxygen and synthesis gas // Progress in Energy and Combustion Science. 2017. № 58. P. 1-35.

References

1. PrAT «Ukrghydroenergho». Available at: <https://uhe.gov.ua/>
2. Bobro D. Gh. Problemni pytannja ta perspektyvy rozvytku vodnevoji energhetyky v Ukrajinі // Nacionaljnyj Instytut strategichnykh doslidzhenj. Available at: <https://niss.gov.ua/sites/default/files/2021-03/voden.pdf>
3. Nova energhetychna strateghija Ukrajinj do 2035 roku: «Bezpeka, energhoefektyvnistj, konkurentospromozhnistj». Available at: <http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/doccatalog/document?id=245213112>
4. Electrolyzer Market Size by Product. Available at: <https://www.gminsights.com/industry-analysis/electrolyzer-market>

5. Motazed K., Salkuyeh Y. K., Laurenzi I. J., MacLean H. L., Bergerson J. A. Economic and environmental competitiveness of high temperature electrolysis for hydrogen production // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021. № 46 (41). P. 21274-21288. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.03.226>
6. Kozyk V. V., Mrykhina O. B., Danylovyh T. B., Stetsiv I. S., Havryliak A. S., Melnyk V. M. Zastosuvannja vodnevykh tekhnologhij dlja zabezpechennja jevropejsjkykh standartiv ekspluataciji avtotransportu // *Mizhnarodnyj naukovyj zhurnal «Internauka»*. Serija: «Ekonomichni nauky». 2021. № 11. doi: <https://doi.org/10.25313/2520-2294-2021-11-7694>
7. Znak Z. O., Mertsalo I. P., Bukliv R. L. Electrochemical Characteristics of Acid Solutions of Spent Saline Chemical Current Sources // *Materials Science*. 2018. № 53 (6). P. 805-810.
8. Hryhorchak I. I., Kostrobii P. P., Stasiuk I. V., Tokarchuk M. V., Velychko O. V., Ivashchyshyn F. O., Markovych B. M. Fizychni procesy ta jikh mikroskopichni modeli v periodychnykh neorghanichno/orghanichnykh klatratak: Monografija. Lviv: Vydavnytvo Rastr-7, 2015. 286 p.
9. Kong L., Li L., Cai G., Liu C., Ma P., Bian Y., Ma T. Techno-economic analysis of hydrogen energy for renewable energy power smoothing // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021. № 46 (3). P. 2847-2861. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.07.231>
10. Cao Y., Hani E. H. B., Mansir I. B., Diyoke C., Dhahad H. A. Exergy and exergo-economic investigation of a novel hydrogen production and storage system via an integrated energy system // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.10.121>
11. Boretti A. There are hydrogen production pathways with better than green hydrogen economic and environmental costs // *International Journal of*

- Hydrogen Energy. 2021. № 46 (46). P. 23988-23995. doi:
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.04.182>
12. Perspektyvy vykorystannja vodnju ta rolj Ukrainy v Jevropejskij vodnevij energohetychnij revoljuciji. Available at:
http://www.atomforum.org.ua/publications/articles/2020/perspektivi_vikori_stannya_vodnyu_ta_rol_ukrayini_v_yevropejskij_vodnevij_energetichnij_r_evolyuciyi
13. Tashcheiev Y. V. et al. Global Trends in the Development of Hydrogen Technologies in Industry // Business Inform. 2020. № 8. P. 103–114. doi:
<https://doi.org/10.32983/2222-4459-2020-8-103-114>
14. Sapountzi F. M. et al. Electrocatalysts for the generation of hydrogen, oxygen and synthesis gas // Progress in Energy and Combustion Science. 2017. № 58. P. 1-35.