

УДК 620.92, 662.769.2

ЕТАПИ РОЗВИТКУ ЗЕЛЕНОЇ ВОДНЕВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ УКРАЇНИ

Отримано 3 лют. 2022; рекомендовано до публікації 21 бер. 2022
Доступно онлайн 17 квіт. 2022**С. О. Кудря¹, О. О. Рєпкін², О. О. Рубаненко³,
Л. В. Яценко⁴, Л. Я. Шинкаренко⁵**Автор для кореспонденції: Любов Яценко
e-mail: renewable@ukr.net

У роботі представлено результати теоретичних і прикладних досліджень та практичного доробку вітчизняних вчених у галузі зеленої водневої енергетики. Завдяки екологічним перевагам водневих технологій їх широке застосування є одним із перспективних сучасних напрямів декарбонізації світової енергетики.

У рамках створення комплексних енергосистем на основі ВДЕ, починаючи з 1980 року в Україні проводились наукові дослідження щодо використання водню як енергоносія та акумулювального середовища. Досліджувались різні форми зберігання і транспортування водню та визначались найприйнятніші методи акумулювання з урахуванням подальшого його використання в енергосистемах на основі ВДЕ: спалювання з отриманням теплової енергії, перетворення в електричну енергію в мотор-генераторах і паливних елементах, використання паливних сумішей з бензином в автотранспорті.

На основі аналізу науково-технічної інформації та практичних напрацювань у галузі водневої енергетики було створено ряд моделей екологічно чистих систем виробництва, зберігання і використання водню різної енергетичної ємності в залежності від потужності енергоустановок на основі ВДЕ, визначено їх енергетичні параметри, економічні показники, технічне і технологічне забезпечення.

У результаті спільної роботи творчих колективів данських і українських вчених за договором між Фолькецентром (Данія) та Інститутом електродинаміки НАН України від 1990 року на основі науково-технічних рішень з отримання водню від ВДЕ, його зберігання і подальшого перетворення в електричну і теплову енергію та використання як палива в автотранспортних засобах, створено першу в Європі вітроводневу станцію. Результати її подальших випробувань стали реальною основою для розвитку сучасної екологічно чистої галузі водневої енергетики.

Наведено результати сучасних досліджень у галузі зеленої водневої енергетики, енергетичний потенціал зеленого водню на території України та перспективи його виробництва і застосування. Визначено основні напрями розвитку водневої енергетики для побудови нової економічної моделі України, спрямовані на створення послідовної загальнодержавної політики, яка забезпечить застосування зеленого водню як енергетично та екологічно ефективного енергоносія – важливої складової безвуглецевого енергетичного комплексу. Бібл. 20. Рис. 3.

Ключові слова: воднева енергетика, відновлювана енергетика, акумулювання.

STAGES OF GREEN HYDROGEN ENERGY DEVELOPMENT OF UKRAINE

Received 3 Feb. 2022; accepted 21 March 2022
Available online 17 April 2022**S. Kudrya¹, O. Riepin², O. Rubanenko³, L. Yatsenko⁴,
L. Shynkarenko⁵**Author for correspondence Liubov Yatsenko
e-mail: renewable@ukr.net

The paper presents the results of theoretical and applied research and practical achievements of domestic scientists in the field of green hydrogen energy. Due to the ecological advantages of hy-

¹ чл.-кор. НАН України, д-р техн. наук, проф., директор Інституту відновлюваної енергетики НАН України, м. Київ, Україна. <https://orcid.org/0000-0002-4798-6853>

² Голова наглядової Ради ТОВ Токмак Солар Енерджі, Енергетичної асоціації «Українська Воднева Рада». <https://orcid.org/0000-0002-3448-6729>

³ д-р техн. наук, доц. каф. електричних станцій і систем, Вінницького національного технічного університету, м. Вінниця, пров. наук. співроб. відділу вітроенергетики Інституту відновлюваної енергетики НАН України, м. Київ, Україна. <https://orcid.org/0000-0002-2660-182X>

⁴ наук. співроб. Інституту відновлюваної енергетики НАН України, м. Київ, Україна. <https://orcid.org/0000-0001-7022-1579>

⁵ мол. наук. співроб. Інституту відновлюваної енергетики НАН України, м. Київ, Україна. <https://orcid.org/0000-0003-2018-3329>

¹ corresponding member of NAS of Ukraine, DScTech, Prof., Director of the Institute of Renewable Energy NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine. <https://orcid.org/0000-0002-4798-6853>

² Chairman of the Board of the company Tokmak Solar Energy; Head of the Energy Association «Ukrainian Hydrogen Council». <https://orcid.org/0000-0002-3448-6729>

drogen technologies, their wide application is one of the promising modern directions of decarbonization of world energy.

As a part of the creation of integrated energy systems based on renewable energy sources, since 1980 in Ukraine conducted research on the use of hydrogen as an energy source and storage medium. Various forms of storage and transportation of hydrogen were studied, and the most acceptable methods of accumulation were determined, considering its further use in renewable energy systems: combustion to obtain thermal energy, conversion into electricity in motor generators and fuel cells, use of fuel mixtures with gasoline in motor transport.

Based on the analysis of scientific and technical information and practical developments in the field of hydrogen energy, several models of environmentally friendly systems of production, storage, and use of hydrogen of different energy capacity depending on the capacity of RES based on RES were created, their energy parameters, economic indicators, technical and technological support were determined.

As a result of joint work of creative teams of Danish and Ukrainian scientists under the agreement between the Folkecenter (Denmark) and the Institute of Electrodynamics of the NAS of Ukraine from 1990 on the basis of scientific and technical solutions for hydrogen production, storage and further conversion into electricity and quality of fuel in vehicles, created the first wind farm in Europe. The results of its further tests became a real basis for the development of a modern environmentally friendly hydrogen energy industry.

The results of modern research in the field of green hydrogen energy, energy potential of green hydrogen in Ukraine and prospects for its production and application are presented. The main directions of hydrogen energy development for building a new economic model of Ukraine are aimed at creating a consistent national policy that will ensure the use of green hydrogen as an energy and environmentally efficient energy source as an important component of a carbon-free energy complex. Ref. 20. Fig. 3.

Keywords: hydrogen energy, renewable energy, storage.

Перелік використаних скорочень та позначень:

ВДЕ – відновлювані джерела енергії

ВЕС – вітроелектростанція

ККД – коефіцієнт корисної дії

нм³ – нормальний метр кубічний

H₂ – водень

Вступ. Основним видам відновлюваних джерел енергії властиві періодичність у роботі та зміна величини потенціалу енергії залежно від часу доби і року. Ця непостійність знижує енергетичну ефективність джерел, тому при використанні енергії відновлюваних джерел необхідний енергоносіє, зручний для зберігання, транспортування і використання. Розвиток водневої енергетики передбачав побудову ефективної та економічної інфраструктури постачання споживачів воднем – універсальним екологічно чистим енергоносієм. Виробництво водню з метою акумуляції й транспортування енергії є ефективним рішенням проблеми стабільного енергопостачання від відновлюваних джерел.

Поняття «воднева енергетика» або «воднева технологія» застосовується для позначення нової області техніки і природничих наук, яка виникла на стику хімії, хімічної технології, фізики, енергетики і машинобудування. Воднева енергетика розглядає цілий комплекс питань, пов'язаних з отриманням, зберіганням і використанням водню для цілей енергетики, зокрема у системах з автономним енергозабезпеченням.

³ DScTech, Associate Prof. of Power Plants and Systems, Vinnytsia National Technical University, Leading Research Fellow, Department of Wind Energy, Institute of Renewable Energy NAS of Ukraine, Kyiv. <https://orcid.org/0000-0002-2660-182X>

⁴ researcher at Institute of Renewable Energy, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv. <https://orcid.org/0000-0001-7022-1579>

⁵ junior researcher at Institute of Renewable Energy, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv. <https://orcid.org/0000-0003-2018-3329>

Перший поштовх до активного розвитку світова воднева енергетика отримала в результаті світової енергетичної кризи 70-х років минулого століття. Другий етап розвитку водневої енергетики спостерігається протягом останнього десятиліття у зв'язку з активним впровадженням положень світової безвуглецевої енергетики у світі – дедалі ширше використовується водень як універсальний екологічно чистий енергоносіє для вирішення важливих енергетичних та екологічних проблем і зменшення ризику, пов'язаного зі збагаченням атмосфери вуглекислим газом. Широке використання водню як високоефективного та екологічно прийняттого енергоносія, а також паливних комірок, здатних із мінімальними втратами перетворювати хімічну енергію водню в електрику, останніми роками розглядаються як найперспективніший шлях до суттєвого скорочення шкідливих викидів в атмосферу [1, 2].

У результаті значного зростання встановленої потужності ВДЕ, насамперед вітрової та сонячної, виникла потреба в обмеженні подачі енергії з відновлюваних джерел в електроенергетичну мережу для збалансування попиту і генерації. Використан-

ня відновлюваної енергії для забезпечення цілих секторів вітчизняної економіки створює серйозні проблеми, якщо не доповнюється ефективними системами акумулювання енергії. Вжиток водню для проміжного зберігання надлишкової електроенергії завдяки створенню як короткострокових і середньострокових, так і довгострокових міжсезонних запасів енергії в енергосистемах на основі ВДЕ сприяє вирішенню цієї проблеми.

Отримання водню електролітичним розкладом води з використанням «зеленої» електроенергії має нульовий викид вуглецю, енергія може зберігатися протягом тривалих періодів часу, слугуючи необхідним системним буфером і забезпечуючи стійкість енергетичних систем. Це дає змогу декарбонізувати широкий спектр кінцевого використання, забезпечуючи чисту генерацію й тепло для транспортування та стаціонарних застосувань. Водень у різному стані може транспортуватися на великі відстані, що дозволяє розподіляти енергію як всередині країни, так і між країнами.

Постановка задачі. Аналіз теоретичних досліджень та практичного доробку вітчизняних вчених у галузі водневої енергетики, основаної на використанні ВДЕ як первинних енергоджерел, сприятиме підвищенню рівня сучасних наукових досліджень та ефективному впровадженню енергосистем на основі зеленого водню в Україні.

Результати досліджень. Наукові дослідження у галузі зеленої водневої енергетики України було започатковано одночасно з початком розвитку відновлюваної енергетики у 80-ті роки минулого століття в Київському політехнічному інституті (зараз – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського») з ініціативи ректора, члена-кореспондента АН УРСР, професора, доктора технічних наук, заслуженого діяча науки і техніки України Григорія Івановича Денисенка.

У 1979 році в Київському політехнічному інституті було створено науково-дослідний відділ (НДВ-5), до основних завдань якого входило проведення фундаментальних та прикладних наукових досліджень з метою комплексного використання енергії Сонця, вітру, біомаси, геотермальної енергії та енергії малих річок. Особлива увага при проведенні наукових досліджень приділялася підвищенню ефективності роботи енергоустановок на основі ВДЕ за рахунок їх комплексного використання із застосуванням акумуляторів електричної й теплової енергії, акумулюванню енергії ВДЕ на основі водню та автоматизації управління режимами їх роботи. При цьому комплексний підхід до викори-

стання енергії відновлюваних джерел із застосуванням акумуляторів теплової та електричної енергії й акумулювання на основі водню на ті часи було застосовано вперше в колишньому Радянському Союзі. Перевірка наукових розробок та відпрацювання робочих режимів проводилась на науководослідному полігоні «Десна», який був розташований на кордоні Київської та Чернігівської областей.

Як відновлювана, так і воднева енергетика на той час у світі ще тільки починали розвиватись, а в колишньому СРСР це був перший серйозний крок до їхнього розвитку.

Починаючи з 1980 року, в рамках створення комплексних енергосистем проводились наукові дослідження щодо використання водню як енергоносія та акумулювального середовища, що було відображено у щорічних наукових звітах відділу НДВ-5. Незважаючи на закритість водневої тематики, пов'язаної з використанням водню у космічній галузі та оборонній сфері, вченими було проведено ґрунтовні дослідження, чому сприяла співпраця із рядом наукових закладів України – Інститутом проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного, Фізико-технічним інститутом низьких температур НАН України (м. Харків) та іншими [2].

Досліджувались різні форми зберігання водню: у стисненому вигляді, у рідкому стані, в гідрідах металів – та визначались найприйнятніші методи акумулювання з урахуванням подальшого використання водню.

Було проведено розрахунки та запропоновано різні варіанти використання водню в енергосистемах на основі ВДЕ, зокрема автономних:

- спалювання з отриманням теплової енергії (водневі пальники побутового та промислового призначення);
- перетворення в електричну енергію (мотор-генератор, паливні елементи);
- використання в автотранспорті (різні варіанти використання водню та його паливних сумішей з бензином).

На основі аналізу науково-технічної інформації та практичних напрацювань у галузі водневої енергетики було створено ряд моделей екологічно чистих систем виробництва, зберігання і використання водню різної енергетичної ємності залежно від потужності енергоустановок, визначено їхні енергетичні параметри, економічні показники, технічне й технологічне забезпечення і створено технічні проекти на системи акумулювання водню такої установленної потужності: 24, 84, 290 та 410 кВт. Системи акумулювання універсальні, можуть бути

застосовані в енергосистемах на ВДЕ (вітрова, сонячна та гідроенергія), при цьому енергія первинних джерел енергії використовується для виробництва водню на електролізних установках (рис. 1) [2, 3].

Основою роботи такої системи є перетворення електричної енергії, виробленої вітрогенератором, в хімічну енергію водню із наступним використанням її споживачами у вигляді електричної й теплової енергії залежно від потреб споживачів.

Основним елементом міжсезонної системи акумулювання на основі водню, на який орієнтовано розрахунок всіх її елементів, є установка для отримання водню. У свою чергу вибір установки пов'язаний із енергетичною потужністю ВДЕ й перебуває у прямій залежності від потужності електрогенерувального обладнання.

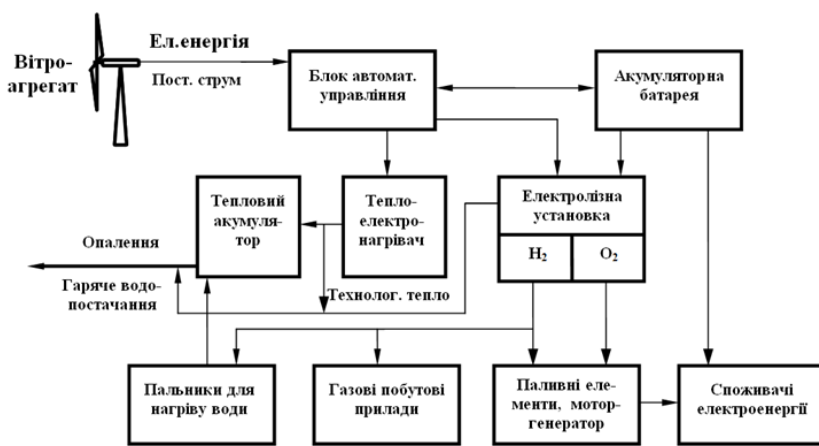


Рис. 1. Схема вітроводневої станції

Fig. 1. The scheme of the wind farm

У 1981 році було розроблено проект станції накопичення енергії СНЕ-1 з такими головними складовими:

- система отримання водню електролітичним методом розкладу води;
- системи зберігання водню у стисненому та рідкому стані;
- використання водню, зокрема за рахунок застосування водень-кисневих паливних елементів.

Досліджувались різні варіанти використання водню в теплових установках, проводились розрахунки з урахуванням ККД установок. В умовах розробленого енергокомплексу на основі ВДЕ великої та середньої потужності запропоновано спалювання водню в палиниках побутового і промислового призначення – для кухонних потреб використовуються плити, оснащені водневими паливниками, для забезпечення гарячого водопостачання і опа-

лення водень спалюється із застосуванням промислових пальників.

Передбачалась побудова нового, більш розширеного, полігону ВДЕ на території бази відпочинку КПІ у Вишгородському районі Київської області, де й було заплановано впровадження СНЕ-1. Однак на ці плани вплинули наслідки Чорнобильської аварії – спочатку доступ до території було закрито, а потім вона була передана іншим відомствам. Необхідно відмітити, що, крім того, практичному впровадженню наукового доробку в галузі водневої енергетики в ті часи також перешкоджала упередженість чиновників від науки та органів влади щодо безпечності використання водню та недостатня поінформованість потенційних виробників та споживачів водню.

З 1987 року наукові роботи з водневої енергетики було продовжено у складі Відділення комплексних енергетичних систем на основі ВДЕ Інституту електродинаміки НАН України.

Аналіз енергетичних та екологічних проблем, що виникли перед вітчизняною та світовою спільнотою у результаті Чорнобильської катастрофи, показав, що недостатньо розвивати екологічно чисту енергетику тільки в одній країні – необхідне об'єднання зусиль вчених і владних структур усіх країн. Одним із прикладів міжнародного співробітництва стали спільні роботи творчих колективів данських та українських вчених, які не тільки збігалися за тематикою,

але й доповнювали одна одну власними науково-технічними рішеннями – у 1990 році було укладено договір між Фолькецентром (Данія) та Інститутом електродинаміки НАН України.

Спільна програма включала співробітництво у галузі вітро- і сонячної енергетики та акумулювання енергії відновлюваних джерел. Особлива увага приділялась створенню ефективних систем зберігання енергії ВДЕ на основі водню. Для вирішення даної проблеми передбачалось об'єднання науково-технічних рішень з отримання водню з ВДЕ, його зберігання і подальше перетворення в електричну й теплову енергію та використання як палива в автотранспортних засобах.

Прикладом впровадження технологій водневої енергетики, розроблених вітчизняними фахівцями, є розробка проекту вітроводневої станції та впровадження її за контрактом Інститутом електродинаміки НАН України в Фолькецентрі (Данія) у 1995 році (рис. 2) [2–4].



Рис. 2. Перша в Європі вітроводнева станція у Фолькецентрі

Fig. 2. Europe's first wind farm in the Folkecenter

Створення українськими і данськими вченими першої в Європі вітроводневої станції стало реальною основою для розвитку цієї надзвичайно перспективної екологічно чистої галузі енергетики. На той час ніхто не поєднував роботу електролізера з вітроустановкою. Данська сторона надала вітроустановку та виконала будівельні роботи, українська – електролізер та виконала монтаж установки. Було також проведено спільні дослідження щодо роботи автомобіля на водні та розроблено ряд схем щодо комплексного використання водню для автотранспорту, отримання теплової енергії спалюванням у котлах та газових плитах, а також отримання електроенергії водень-кисневих паливних елементах.

Основними елементами вітроводневої станції є вітроелектричний агрегат та система акумулювання на основі водню. До складу системи акумулювання входила електролізна установка СЕУ-4 (продуктивність за воднем $4 \text{ м}^3/\text{год}$), обладнання для зберігання водню та кисню і перетворення водню в енергію необхідного виду.

При розгляді технічних характеристик промислових електролізних установок найприйнятнішою на той час для вирішення задач у комплексі з вітроелектричними установками вважалась електролізна установка для виробництва водню методом розкладу води типу СЕУ російського виробництва. Було визначено, що ця установка може ефективно використовуватися в енергетичних комплексах на основі ВДЕ, причому в процесі експлуатації й проведення відповідних науково-дослідних робіт можливі деякі зміни в її конструкції та режимах роботи з метою вдосконалення процесу електролізу та підвищення ККД установки. Для цього були реальні передумови – можливість зміни режимів роботи (підвищення робочих температур і тиску), заміна матеріалів електродів, зміна відстані між електродами, заміна азбестових діафрагм на діафрагми з

нових матеріалів та інше. Отже, вибір установки СЕУ-4 в період розробки вказаної вітроводневої станції не тільки забезпечував виробництво водню, але й передбачав можливість проведення науково-дослідних робіт з метою вдосконалення технології одержання водню методом електролітичного розкладу води.

У процесі виготовлення вітроводневої станції було проведено деякі зміни в конструкції електролізера СЕУ-4 для інтенсифікації технологічних параметрів та поліпшення екологічних умов при роботі установки. Випробування та експлуатація впродовж багатьох років показали ефективність застосування такого комплексу в цілому.

Матеріали про результати впровадження було опубліковано у виданні Енергетичного Центру ЄС у Києві (рис. 3) [5].

У звіті Інституту електродинаміки НАН України, наданому у звіті про діяльність Національної академії наук України у 1995 році, зазначено: «Розроблено принципи побудови систем акумулювання і перетворення енергії відновлюваних джерел. На основі цих досліджень разом з ученими Данії (Фолькецентр) вперше в Європі створено вітроводневу станцію потужністю 100 кВт, яка забезпечує стабільне енергопостачання автономних об'єктів електричною і тепловою енергією» [6].

Створення українськими й данськими вченими вітроводневої станції дало поштовх до подальшого розвитку наукових досліджень щодо отримання, зберігання та використання водню. Тож у 1998 році на запит данської сторони було проведено детальне дослідження щодо встановлення в Україні техніко-економічних показників водневих енергетичних комплексів різної потужності та з різними формами зберігання. Була розглянута доцільність застосування та можливість відмови від застосування



Схема накопичення енергії на основі водню

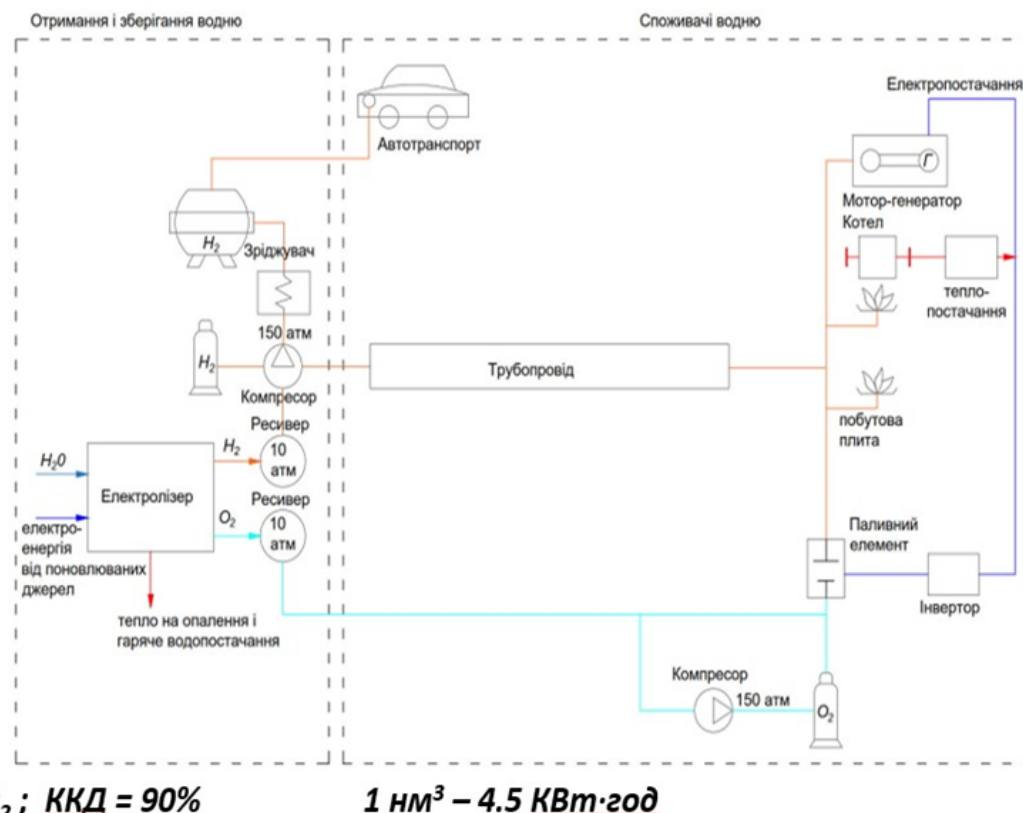


Рис. 3. Схема накопичення енергії на основі водню

Fig. 3. Hydrogen-based energy storage scheme

електролізного обладнання російського виробництва. У результаті досліджень було визначено нецільність застосування для отримання водню електролізного обладнання російського виробництва. На той час запропоновано використання електролітичних установок із більш високими техніко-економічними показниками, зокрема італійського виробництва типу WERDER MODEL.

Проблемами отримання водню з використанням ВДЕ як первинних джерел енергії, зберігання водню в різних формах та використання водню як акумулятора енергії й моторного палива науковці продовжують займатись у наукових відділах Інституту відновлюваної енергетики НАН України. Було встановлено, що у водневій енергетиці на сучасному рівні її розвитку найперспективнішим є використання як первинних енергоджерел сонячної, вітрової енергії та гідроенергії. Розгляд енергосистем з акумулюванням водню на основі цих джерел енергії показав, що вартість генерування електроенергії сьогодні ще досить висока, але цілком прийнятна при врахуванні «зеленого тарифу» на електроенергію, вироблену ВДЕ.

Найбільш перспективним до застосування у віднов-

люваній енергетиці є виробництво водню методом електролітичного розкладу води. Економічні показники цього процесу при використанні електролітичного обладнання нового покоління достатньо високі для створення конкурентоспроможних систем акумулювання на основі водню для відновлюваної енергетики. Крім того, основною сировиною в цьому разі є вода – найдоступніше й практично невичерпне джерело. Використання електроенергії, отриманої від ВДЕ, для виробництва водню може бути реалізоване в різних варіантах, найприйнятнішим є пряме під'єднання через випрямляч для живлення електролізера. Досить перспективним може бути передача електроенергії від ВДЕ до електромережі, а для виробництва водню вона використовується на певній відстані [7].

Норвезька компанія Nel почала будівництво найбільшого в світі заводу з виробництва повністю автоматизованих електролізерів. Нові потужності будуть побудовані в рамках розширення виробництва, що діє в норвезькому Notodden [8].

Створено компактне нове електролізне обладнання, призначене як для промисловості, так і для енергетичних ринків, забезпечить значне поліпшення

технічних і економічних можливостей. Як приклад сучасних водневих генераторів створено комплексну систему отримання електролітичного водню – компактну, з високими показниками ефективності й експлуатаційною стабільністю, – в якій все обладнання об'єднано в один контейнер [9].

Перспективним вважається виробництво водню при використанні електроенергії малих ГЕС, розташованих у місцях, важкодоступних для проведення ліній електропередач. Такі проекти можуть бути ефективними при впровадженні на малих річках Закарпаття; водень доставлятиметься до місця використання у стисненому вигляді або в криогенному стані, що за відповідних умов значно дешевше, ніж проведення ліній електропередач – проекти такого типу вже є у світовій практиці.

Останніми роками спостерігається бурхливий розвиток світової водневої енергетики – вже понад 20 країн і понад 50 корпорацій розробили довгострокові програми розвитку водневих технологій, які реалізуються за державної підтримки через надання пільг, бюджетне фінансування та міжнародну технологічну кооперацію. Не тільки Євросоюз у цілому, але й окремі його країни затвердили на урядовому рівні власні водневі стратегії (Франція, Німеччина, Нідерланди, Норвегія, Великобританія), не кажучи вже про США, де водневі технології розвиваються впродовж останніх 20 років [10].

В інтегрованій енергетичній системі водень може забезпечити декарбонізацію таких енергоємних секторів, як транспорт, промисловість, енергетика тощо. У Європейській Водневій Стратегії розглядаються питання інвестицій, законодавчих і ринкових механізмів та світових інновацій. У ЄС запропоновано поетапний підхід: у 2020–2024 роках встановлення як мінімум 6 ГВт водневих електролізерів, які вироблятимуть до 1 млн тонн водню з ВДЕ; у 2025–2030 роках – близько 40 ГВт електролізерів (до 10 млн тонн чистого водню). До 2050 року водневі технології мають широко використовуватися у всіх сферах діяльності. Для досягнення цієї мети буде створено Європейський альянс чистого водню (European Clean Hydrogen Alliance), у рамках якого співпрацюватимуть представники промисловості, влади, громадськості та Європейського інвестиційного банку для розвитку інвестиційних водневих проектів [11].

Україна має значний технічно досяжний потенціал розвитку офшорної вітроенергетики на мілководних територіях великих акваторій – Азовського та Чорного морів, затоки Сиваш, водосховищ Дніпровського каскаду ГЕС, лиманів. Ефективним шляхом вирішення проблеми надлишку виробництва

електроенергії офшорними ВЕС є створення акумулювальних потужностей за рахунок виробництва водню [12].

За результатами проведених ІВЕ НАН України досліджень, Україна має потенціал для створення на своїй території 250 ГВт потужностей офшорних ВЕС із середньорічним виробництвом електроенергії 984 млрд кВт/год і може забезпечити середньорічне виробництво 219 млрд нм^3 (19,5 млн т) зеленого водню методом електролізу води. У результаті проведених досліджень встановлено, що Україна має високий середньорічний технічний потенціал виробництва зеленого водню – 505 132 млн нм^3 /рік, що забезпечило участь України в європейській програмі «2x40 GW Green Hydrogen Initiative», відповідно до якої в Україні буде залучено 10 ГВт нових потужностей електролізерів для виробництва зеленого водню. Вказана ініціатива передбачає встановлення 2 ГВт нових потужностей електролізерів для внутрішнього ринку і 8 ГВт – для експорту водню трубопроводами до ЄС. Загальний потенційно можливий обсяг виробництва зеленого водню на території України становить 505132 млн нм^3 . Для розрахунку потенційно можливого обсягу виробництва зеленого водню за допомогою електролізу води передбачено питоме споживання електроенергії 4,5 кВт·год/ нм^3 H_2 , або 50,56 кВт·год/кг H_2 [2, 13–14]. Методичне забезпечення представлено в «Атласі енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України» [13].

Європейська нова «зелена» Угода є унікальною можливістю для України створити й розвивати водневу економіку, яка потенційно може зробити Україну енергетично незалежною, з експортно орієнтованою економікою. Передумовою цього є наявність в Україні другого в Європі потенціалу енергії ВДЕ.

Україна має значний науковий потенціал для впровадження водневих технологій. Останніми роками в Інститутах НАН України в рамках відомчої програми, а також в рамках цільової комплексної програми НАН України «Водень в альтернативній енергетиці та новітніх технологіях», яка діє з 2011 року, проводяться роботи щодо створення новітніх матеріалів і технологій для потреб водневої енергетики, направлені на створення ефективних методів отримання, зберігання та використання водню. Пріоритетним напрямом досліджень є використання відновлюваних джерел як первинних енергоресурсів для отримання водню. Загальна кількість проектів цієї програми – 43, їх виконують 17 установ [15].

Інститут відновлюваної енергетики має спільні

впровадження різноманітних розробок комплексних енергосистем на основі ВДЕ: комбіновані вітросонячні установки – спільно з Інститутом теплофізики НАН України, Інститутом проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, Національним технічним університетом України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», Інститутом проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України тощо.

Визначено основні засади для розроблення та реалізації завдань і заходів Дорожньої карти розвитку водневої енергетики України на період до 2035 року із забезпечення використання водню як екологічно чистого енергоносія. Вона, з урахуванням положень «Енергетичної стратегії України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність», згідно з розпорядженням КМУ № 497-р від 06.06.2018 «Про затвердження плану заходів з реалізації етапу «Реформування енергетичного сектора (до 2020 року)», повинна забезпечити досягнення основної мети – підвищення ефективності освоєння ВДЕ та підвищення стабільності енергосистеми України за рахунок впровадження систем акумулювання.

Авторам належить ряд нових розробок у галузі водневої енергетики, зокрема створення аналітичних матеріалів щодо напрямів та перспектив розвитку водневої енергетики, визначення перспектив використання опрісненої морської води для отримання зеленого водню від офшорних ВЕС методом електролітичного розкладу та розробка концепції Дорожньої карти розвитку водневої енергетики України на період до 2035 року, а також участь у визначенні енергетичного потенціалу зеленого водню на території України та розробці проєкту водневої стратегії України до 2050 року.

IBE НАН України підвищуватиме рівень фундаментальних, прикладних досліджень і впровадження нових розробок і водневих технологій; першочерговими завданнями є:

- розробка ефективних систем акумулювання на основі водню;
- створення екологічно чистого транспорту на основі водню.

Перспективним варіантом у майбутньому є створення автономних вітроводневих станцій великої потужності у віддалених від ліній електропередач районах, вироблена електроенергія яких буде повністю спрямована на виробництво електролітичного водню. Тож воднева енергетична інфраструктура має бути забезпечена системами зберігання водню, трубопроводом для транспортування водню,

а також системами використання водню для власних потреб. Проєкти щодо транспортування водню трубопроводами особливо цікаві, надто в суміші з природним газом. Для України це має важливе значення, зокрема для збереження нормального функціонування магістрального трубопроводу природного газу. Проведено дослідження щодо можливого використання газотранспортної системи України для транспортування виробленого зеленого водню до країн Європи, які показали можливість транспорту газової суміші із вмістом водню до 25 %, а це 16 млрд м³ зараз або 10 млрд м³ протягом наступних чотирьох років [10].

Більшістю країн водень у суміші з природним газом розглядається як головна можливість для декарбонізації газопровідних поставок. Експерти з Міжнародного енергетичного агентства підрахували, що додавання лише 20 % водню в європейську газову мережу приведе до скорочення викидів CO₂ на 60 млн тонн на рік (цей обсяг можна порівняти з викидами вуглекислого газу Данії за такий самий період) [10].

В Україні побудовою нової водневої економіки і розвитком водневої енергетики та залученням країни до водневого європейського енергетичного простору займається Енергетична Асоціація «Українська Воднева Рада», яка в 2018 році першою в Україні і серед країн не членів ЄС стала членом підрозділу європейської комісії організації «Водень Європа» (Hydrogen Europe).

«Українська Воднева Рада» спільно з IBE НАН України виступає із законодавчою ініціативою інтеграції водневих та енергетичних рішень до законодавчої бази України.

Основними напрямками розвитку водневої енергетики для побудови нової економічної моделі на новій енергетичній водневій моделі України є [16]:

- розробка та впровадження ефективних енергосистем на основі відновлюваних джерел енергії, забезпечених системами акумулювання, зберігання, транспортування та використання водню різного виду й потужності (так званий зелений водень);
- розробка та впровадження систем акумулювання, зберігання, транспортування та використання водню різного виду й потужності в традиційній енергетиці для накопичення пікової електроенергії (промисловий водень);
- розробка та впровадження систем акумулювання та використання водню різного виду й потужності у транспортній галузі (автомобільний, залізничний транспорт);

- розробка та впровадження систем трубопровідного транспортування водню, зокрема як добавок до природного газу;
- досягнення 25-відсоткової частки водню в газотранспортній системі (ГТС) України;
- розробка та впровадження механізмів державного управління і регулювання у сфері водневої енергетики;
- розробка законодавчих та нормативно-правових актів, спрямованих на розвиток водневої енергетики;
- підвищення рівня конкурентоспроможності об'єктів відновлюваної енергетики;
- розробка вимог та заходів щодо безпеки в процесі виробництва, зберігання, транспортування й споживання водню;
- створення систем аналітично-інформаційного забезпечення науково-технічного розвитку водневої енергетики;
- створення системи метрологічного та сертифікаційного забезпечення;
- забезпечення ширшого залучення об'єктів інтелектуальної власності до процесу розвитку водневої енергетики;
- створення профільної інфраструктури водневої енергетики на основі вже існуючих навчальних, проектно-конструкторських та науково-дослідницьких організацій;
- створення освітньої бази;
- сприяння утворенню приватних та громадських організацій з розповсюдження та популяризації водневої енергетики.

Використання водню як палива є одним із напрямів створення сучасної вітчизняної транспортної галузі, яка відповідатиме екологічним стандартам. Створені й удосконалюються різні варіанти водневих автомобілів – оснащені ДВЗ, на основі паливних комірок, гібридні тощо. Автомобіль на водні, який працює із застосуванням паливних комірок, функціонує за принципом електромобіля; основними його перевагами є поєднання в ньому кращих характеристик автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння та електромобілів. Запас ходу дуже високий, особливо коли батареї можна заряджати не тільки від реакції водню з киснем, але і від звичайної електричної мережі [17].

Найбільшими забруднювачами повітря у багатьох містах України є автомобілі, насамперед це стосується міст-«мільйонників», у яких викидів вихлопних газів у десятки разів більше, ніж у європей-

ських мегаполісах. За підрахунками експертів, близько 40 % забруднення довкілля відбувається внаслідок роботи транспорту [18].

Безумовно, це потребуватиме вирішення багатьох завдань та проведення цілої низки заходів, основаних на ефективній загальнодержавній політиці та підтримці органів місцевого самоврядування. Однак завдяки ентузіазму представників бізнесу є деякі зрушення. Приміром, автомобіль японської марки Toyota, який заправляється воднем, вперше сертифікували в Україні. Сертифікація тривала півтора місяця, оскільки автомобіль необхідно було правильно класифікувати, щоб він відповідав чинним стандартам безпеки. Надалі кожне наступне розмитнення водневого автомобіля займатиме лише три дні. Toyota Mirai – водневий гібридний автомобіль на паливних елементах, який вперше був представлений у листопаді 2013 року на Токійському автосалоні. Продаж в Японії стартував у 2014 році з ціною 57 500 дол. США, у США та Європі – на кінець 2015 року. Максимальний ККД перетворення в електричний струм у водневих машин становить 45 % (середній показник для авто на бензині або дизелі – 35–38 %). Заправка до повного бака в Німеччині обходиться в 45 євро (9 євро за 1 кг водню). Процес заправки максимально схожий на такий у традиційних авто й триває лише три хвилини. Поки найближчі до нас заправки є в Німеччині; їх налічується близько 150. До кінця року 23 водневих заправки відкривуться в Польщі.

Заправка вітчизняних автомобілів здійснюватиметься в Польщі, однак проводяться роботи щодо створення першої водневої заправки в Україні. У планах на найближчі роки є розбудова інфраструктури для водневого транспорту. [19, 20].

Стратегія розвитку зеленої водневої енергетики України повинна бути направлена на створення послідовної загальнодержавної інформаційної політики, яка забезпечить сприйняття зеленого водню як енергетично та екологічно ефективного енергоносія, важливої складової безвуглецевого енергетичного комплексу. Поширення змістовної інформації щодо всіх напрямів розвитку зеленої водневої енергетики загалом в Україні та міжнародного партнерства має охоплювати всі рівні державного та приватного господарювання як центрального апарату, так і місцевого самоврядування. Важливим є розповсюдження інформаційно-пропагандистської діяльності за участю громадських організацій та створення дієвих зв'язків із громадськістю.

В ІВЕ НАН України регулярні періодичні видання журналу «Відновлювана енергетика» та щорічне видання збірника міжнародної науково-технічної

конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність XXI століття» висвітлюють проблеми, шляхи їх вирішення та перспективи розвитку всіх напрямів освоєння ВДЕ та розвитку водневої енергетики. Для залучення молоді до навчання за даною тематикою в рамках конференції створено молодіжну секцію, в якій можуть зробити свої доповіді не тільки студенти та аспіранти, а й школярі Малої академії наук України. Починаючи із 2017 року ІВЕ НАН України спільно з кафедрою ВДЕ НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського» та Малою академією наук України проводить активну діяльність із залучення учнівської молоді до наукової та науково-технічної діяльності. До певних курсів підготовки бакалаврів, магістрів та аспірантів кафедри відновлюваної енергетики при Національному технічному університеті України «КПІ ім. Ігоря Сікорського» вже понад десятиліття входить воднева енергетика. Планується створення окремого курсу з водневої зеленої енергетики.

До поширення інформації та формування громадської свідомості населення щодо використання енергії відновлюваних джерел для виробництва зеленого водню в Україні можуть бути залучені ряд існуючих громадських організацій: Асоціація біоенергетики; Асоціація геотермальної енергетики; Молодіжна організація «Зелена енергетика майбутнього» та інші.

Висновки. Використання результатів теоретичних і прикладних досліджень та практичного доробку вітчизняних вчених у галузі зеленої водневої енергетики сприятиме подальшому ефективному її розвитку. В майбутньому водень відіграватиме провідну роль в інтеграції великих обсягів відновлюваної енергії, в секторах транспорту, опалення та охолодження, які сьогодні важко декарбонізувати.

При проведенні оцінювання прибутковості зелених водневих енергосистем необхідно брати до уваги також ряд важливих факторів: способи зберігання, транспорт і використання водню, існуючий попит, ціни та зменшення витрат на знешкодження шкідливих викидів. При застосуванні водень-кисневих паливних комірок необхідно враховувати, що позитивний вплив на економічну ефективність матиме можливість утилізації кисню, отриманого в процесі електролізу води.

Розв'язання питання розвитку водневої енергетики України шляхом виконання заходів щодо основних напрямів реалізації проєктів водневої енергетики високої енергоефективності з використанням різних ВДЕ та систем акумулювання і використання водню різного виду та потужності відповідає пріоритетам державної політики – розвитку сфери ви-

робництва енергоносіїв з відновлюваних джерел, які можуть забезпечити у 2050 році збільшення частки ВДЕ у паливно-енергетичному балансі України до 25 %, що забезпечить підвищення рівня енергетичної незалежності України.

ПОСИЛАННЯ

1. Н. М. Мхитарян, *Энергетика нетрадиционных и возобновляемых источников*. Київ, Україна: Наук. думка, 1999.
2. *Відновлювані джерела енергії*, С. О. Кудря, ред. Київ, Україна: Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2020.
3. С. О. Кудря, "Системи акумулювання і перетворення енергії відновлюваних джерел". дис. док. тех. наук, Ін-т електродинаміки НАН України, Київ, 1996.
4. *Енергоефективність та відновлювані джерела енергії*. А. К. Шидловський, ред. Київ, Україна: Українські енциклопедичні знання, 2007.
5. *Украина: эффективность малой энергетики*. Київ, Україна: Издание Энергетического Центра ЕС в Киеве, 1996.
6. *Звіт про діяльність Національної академії наук України у 1995 році*. Ч. 1, Київ, Україна: Наук. думка, 1996.
7. М. Д. Волошин, *Конспект лекцій з дисципліни "Електрохімічна технологія неорганічних речовин"*, Дніпродзержинськ, Україна: ДДТУ, 2012.
8. Водородная экономика: Норвегия увеличит мощности по производству электролизеров в 10 раз. [Електронний ресурс]. Доступно: <http://reenen.ru/hydrogen-economy-norway-will-increase-global-capacities-for-the-production-of-electrolyzers-tenfold/>
9. McPhy Energy та DeNora підписують технологічне партнерство. [Електронний ресурс]. Доступно: www.denora.com , www.mcphy.com
10. «Зелений» водень для України: як урятувати природу та ГТС [Електронний ресурс]. Доступно: <https://mind.ua/openmind/20204093-zelenij-voden-dlya-ukrayini-yak-uryatuvati-prirodu-ta-gts>
11. Стратегія інтеграції енергетичних систем [Електронний ресурс]. Доступно: <http://uwea.com.ua/ua/news/entry/>
12. Біла Книга 2021 Офшорна вітроенергетика та "зелений" водень: відкриття нових меж енергетичної потужності України. [Електронний ре-

- сурс]. Доступно: https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/2_5438583199909284286.pdf.
13. *Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України*. Київ, Україна: Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2020.
 14. К. В. Петренко, І. В. Іванченко, О. О. Кармазін, “Аналіз водних ресурсів України в контексті можливості їх використання для виробництва «зеленого» водню”, *Відновлювана енергетика*, № 2 (65), с. 19–28, 2021. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.2\(65\).19-28](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.2(65).19-28)
 15. *Фундаментальні аспекти відновлювано-водневої енергетики і паливно-комірчанних технологій*, Ю. М. Солонін, Ред. Київ, Україна: «KIM», 2018.
 16. С. О. Кудря, О. О. Рєпкін, Л. В. Яценко, М. Д. Ткаленко, Л. Я. Шинкаренко, “Концепція Дорожньої карти розвитку водневої енергетики України на період до 2035 року”, *Відновлювана енергетика*, № 4 (59), с. 22–28, 2019. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.4\(59\).22-28](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.4(59).22-28)
 17. Альтернатива – автомобілі на водневому паливі [Електронний ресурс]. Доступно: <http://autopark.pp.ua/808-alternativa-avtomobl-na-vodnevomu-paliv.html>
 18. Екологічний стан українських міст [Електронний ресурс]. Доступно: <https://www.radiosvoboda.org/a/2081472.html>.
 19. В Україні вперше сертифікували авто, що заправляється воднем [Електронний ресурс]. Доступно: <https://www.epravda.com.ua/news/2021/09/3/677452/>
 20. Із відходів – тільки вода. Liga протестувала перші автомобілі на водні в Україні [Електронний ресурс]. Доступно: <https://biz.liga.net/ua/all/avto/article/iz-othodov-tolko-voda-liga-protestovala-pervye-avtomobili-na-vodorode-v-ukraine>
 4. *Energy efficient and renewable energy sources*, (in Ukrainian), A. K. Shydlovskiy, Ed. Kyiv, Ukraine: Ukrainski entsyklopedychni znannia, 2007.
 5. *Ukraine: efficiency of small power generation*, (in Russian) Kyiv, Ukraine: Publication of the EU Energy Center in Kyiv, 1996.
 6. *Report on the activities of the National Academy of Sciences of Ukraine in 1995*, Part 1, (in Ukrainian), Kyiv, Ukraine: Naukova dumka, 1996.
 7. M. D. Voloshyn, *Synopsis of lectures on the subject "Electrochemical technology of inorganic substances*, (in Ukrainian). Dniprodzerzhynsk, Ukraine: DDTU, 2012.
 8. Hydrogen economy: Norway to increase electrolytic capacity by 10 times, (in Russian). [Online]. Available: <http://renen.ru/hydrogen-economy-norway-will-increase-global-capacities-for-the-production-of-electrolyzers-tenfold/>
 9. McPhy Energy and DeNora sign technology partnership, (in Russian) [Online]. Available: www.denora.com, www.mcphy.com
 10. "Green" hydrogen for Ukraine: how to save nature and the GTS6 (in Ukrainian). [Online]. Available: <https://mind.ua/openmind/20204093-zelenij-voden-dlya-ukrayini-yak-uryatuvati-prirodu-ta-gts>
 11. Energy systems integration strategy, (in Ukrainian). [Online]. Available: <http://uwea.com.ua/ua/news/entry/>
 12. *White Book 2021 Offshore wind energy and "green" hydrogen: opening new frontiers of Ukraine's energy capacity*, (in Ukrainian). [Online]. Available: https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/2_5438583199909284286.pdf
 13. *Atlas of energy potential of renewable energy sources in Ukraine*, (in Ukrainian). Kyiv, Ukraine: Instytut vidnovliuvanoi enerhetyky NAN of Ukraine, 2020.
 14. K. Petrenko, I. Ivanchenko, and O. Karmazin, “Analysis of water resources of Ukraine in the context of the possibility of their use for the production of "green" hydrogen”, (in Ukrainian), *Vidnovliuvana enerhetyka*, № 2 (65), pp.19–28, 2021. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.2\(65\).19-28](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.2(65).19-28)
 15. Fundamental aspects of renewable hydrogen energy and fuel cell technologies, (in Ukrainian). Yu. Solonin, Ed. Kyiv, Ukraine: «KIM», 2018.

REFERENCES

1. N. M. Mhitaryan, *Energy from non-traditional and renewable sources*, (in Russian), Kyiv, Ukraine: Naukova dumka, 1999.
2. *Renewable energy sources*, (in Ukrainian), S. Kudria, Ed. Kyiv, Ukraine: Instytut vidnovliuvanoi enerhetyky NANU, 2020.
3. S. O. Kudria, “Renewable energy storage and conversion systems” (in Ukrainian), Dokt. thesis, Kyiv,

16. S. Kudria, O. Riepin L. Yatsenko, M. Tkalenko, and L. Shynkarenko, "The concept of the Roadmap for the development of hydrogen energy in Ukraine for the period up to 2035]", (in Ukrainian), *Vidnovliuvana enerhetyka*, № 4 (59). p. 22–28, 2019. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.4\(59\).22-28](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.4(59).22-28)
17. The alternative is hydrogen fuel cars, (in Ukrainian). [Online]. Available: <http://autopark.pp.ua/808-alternativa-avtomobl-na-vodnevomu-paliv.html>
18. Ecological condition of Ukrainian cities, (in Ukrainian). [Online]. Available: <https://www.radiosvoboda.org/a/2081472.html>
19. For the first time in Ukraine, a hydrogen-powered car was certified, (in Ukrainian). [Online]. Available: <https://www.epravda.com.ua/news/2021/09/3/677452/>
20. Of the waste - only water. Liga tested the first hydrogen cars in Ukraine, (in Ukrainian). [Online]. Available: <https://biz.liga.net/ua/all/avto/article/iz-othodov-tolko-voda-liga-protestovala-pervye-avtomobili-na-vodorode-v-ukraine>