

УДК 551.582

НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВА ЕНЕРГЕТИКА 2. ВОДНЕВА ЕНЕРГЕТИКА: ПРОБЛЕМИ, ДОСЯГНЕННЯ, МОЖЛИВІ РИЗИКИ (ОГЛЯД)

Басок Б.І., чл.-кор. НАН України, Базєєв Є.Т., канд. техн. наук

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Канніст, 2а, Київ, 03057, Україна

<https://doi.org/10.31472/tpe.3.2022.6>

Визначено шляхи зниження вуглецевої ємності економіки в т. ч. з активним використанням в енергетиці заходів з підвищення енергоефективності, широкого використання відновлюваних джерел енергії та водню з можливими проблемами і ризиками переходу до досягнення низьковуглецевої енергетики.

Ways to reduce the carbon capacity of Ukraine's economy through the active use of energy efficiency measures in energy, extensive use of renewable energy sources, in particular hydrogen, with possible problems and risks of transition to low-carbon energy.

Бібл. 27, табл. 1, рис. 3.

Ключові слова: глобальне потепління, низьковуглецева енергетика, відновлювані джерела енергії, водень, ризики.

Вітчизняна енергетика на шляху свого становлення та розвитку проходила точки біфуркації, що змінювали тренд її розвитку. Це визначалося зміною структури балансу первинних енергоресурсів, прогресом технологій у їх перетворенні, соціально-політичними змінами країни. Наприкінці ХХ – на початку ХХІ століття інструментально зафіксована зміна клімату – глобальне потепління (як наслідок емісії парникових газів, здебільшого від енергетики) – змусило світову та регіональну енергетику шукати шляхи низьковуглецевого розвитку (декарбонізації) економіки. Ця проблема стала актуальною і в Україні. Було вжито низку політичних, науково-технологічних та економічних ініціатив і прийнято низку регуляторних документів з декарбонізації економіки (узагальнено в [1]).

Наразі з'явилася нова точка біфуркації в енергетиці країни, яка сталася наслідок агресії Росії проти України, що змушує переглянути тренди розвитку вітчизняної енергетики у військовий та післявоєнний періоди соціально-економічного розвитку з одночасним погодженням з програмою розвитку європейської енергетики, зокрема, з терміновою розробкою програми COM(2022) 108 final [2], спрямованої на:

- диверсифікацію зовнішніх поставок газу за рахунок скрапленого та трубопровідного газу від неросійських постачальників, пришвидшення досягнення промислових обсягів використання біометану та водню (виділено авторами).

- пришвидшення темпів скорочення частини викопного палива у кінцевому споживанні (в промисловості, для побутових потреб тощо) шляхом

підвищення енергоефективності, збільшення частки ВДЕ, розбудови відповідної інфраструктури.

Сформульована останнім часом парадигма низьковуглецевого розвитку та стратегія зниження ризиків від пагубних кліматичних змін, у т.ч. глобального потепління передбачає підвищення енергоефективності економіки, збільшення тренду використання ВДЕ, електрифікації (у т. ч. електрифікації транспорту), розвитку водневої енергетики [3]. У “Новому зеленому курсі” передбачається повна відмова від викопного палива до 2050 року [4]. Для європейських країн низьковуглецевий шлях розвитку означає зниження витрат на імпорт вуглеводневих енергоресурсів, підвищення енергоефективності, зниження ризику смертності від шкідливих викидів вуглеводневої енергетики. Таким чином, кліматичний фактор ризикує стати приводом для згортання вуглеводневої енергетики та водночас стати стимулом для просування на ринок альтернативних джерел енергії (АДЕ), ВДЕ (зелених технологій) та водневої енергетики. Є й інші недооцінені ризики, зумовлені принциповою обставиною, а саме: надійна вуглеводнева система вимагатиме кратного зростання витрат на енергію – з 8% світового ВВП до майже 30% до 2035-2050 років. Це може стати ключовим обмеженням на шляху реалізації прискорених сценаріїв енергетичного переходу [5].

Ставлення до тренду використання в енергетичному балансі АДЕ - все ж таки не завжди зумовлене. З одного боку АДЕ – це чи не основний енергоресурс майбутнього, з іншого – обережний оптимізм: частка АДЕ у загальному енергетичному балансі до кінця

XXI століття залишається порівняно незначною, переважуватимуть вуглеводневі види палива зі збільшенням частки природного газу. Принципові особливості проблем використання АДЕ представлені у [6].

Теза про порівняно незначну роль ВДЕ в ПЕК аргументується принциповими фізичними обмеженнями, притаманними таким видам енергоресурсів, а саме: їх низькою густиною потоку енергії ("розсіяна енергія") та низькою первинною енергетичною ефективністю виробництва (видобутку), рис. 1.

У регіональних масштабах роль таких енергоресурсів, відповідним чином техніко-економічно обґрунтована, може бути значною. [6, 7].

З початку 80-х почала обговорюватися проблема використання в енергетиці водню. Вільний водень як вид енергоресурсу у земних умовах практично відсутній. Існує глибинна воднево-метанова дегазація через розломи в земній корі, що призводить до руйнування озонового шару в атмосферних висотах (рис. 2). Наприклад, дебіт водню в трубці одного з розривів досягав 105 м³ на добу (1150 л/с). Як видно із рис. 2 концентрація водню становить 10-50 ppm [8], а концентрація парникового газу CO₂ в атмосфері на сьогодні (травень 2022, північна широта, близька до широти Мурманська) знаходиться в діапазоні 405...430 ppm [9].

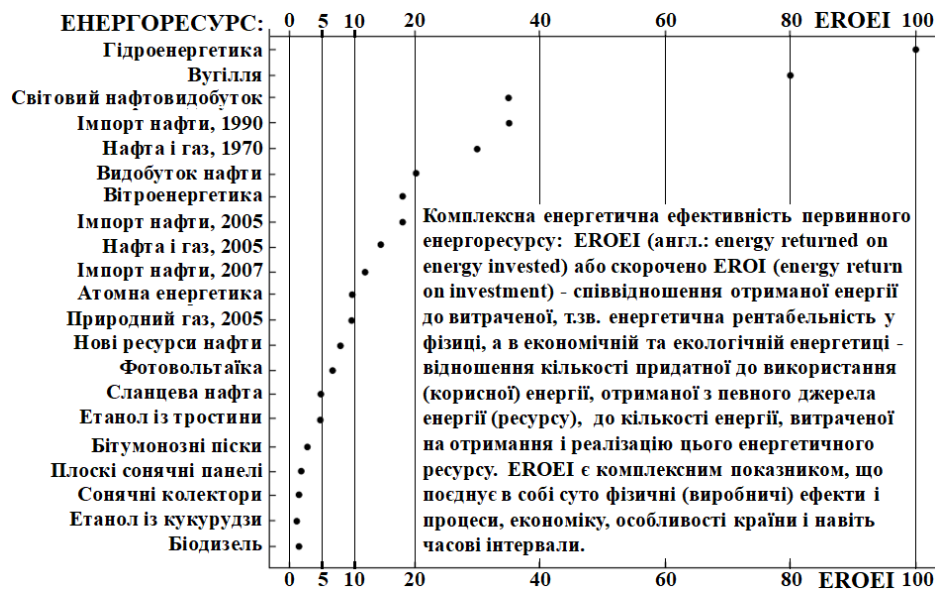


Рис. 1. Енергетична ефективність первинного енергоресурсу

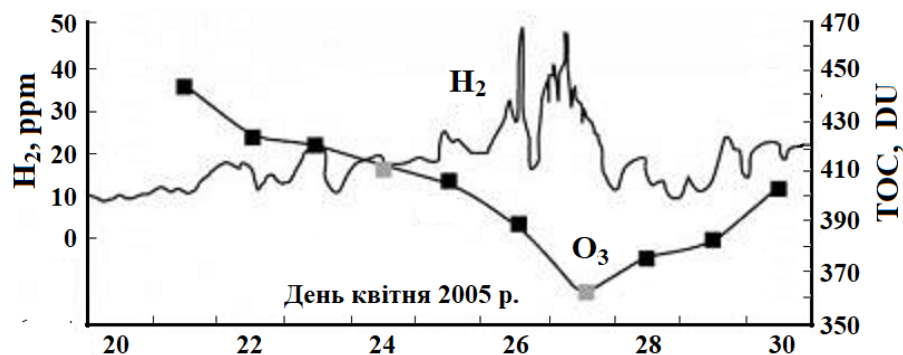


Рис. 2. Концентрація підґрунтового водню в Хібінських горах (ліва вісь) та загальний вміст озону (права вісь) над Кольським півостровом у квітні 2005 р. Чорні квадрати – дані наземної озонотричної станції Мурманська, сірі квадрати – дані американського супутника Earth Probe. TOC (Total Organic Carbon, вміст органічної речовини) – загальний вміст озону O₃, DU - одиниця Добсона, що дорівнює $21,451 \cdot 10^{-6} \text{ кг/м}^2$

"Випадки виходу величезних кількостей газів, що містять водень, і сам водень у чистому вигляді геологам відомі в минулому." [10]. В інституті геологічних наук НАН України проведено дослідження, результати яких докорінно змінюють уявлення про ресурсний потенціал земних надр та про закономірність нафтогенезу та рудоутворення. "Три нафтогазоносні регіони на території України відносяться до надглибоких осадових басейнів з аномально високими потужностями осадового типу. ...Глибокі горизонти цих басейнів є невичерпними джерелами вуглеводнів, водню, гелію, у т. ч. ^3He . Їхнє освоєння – це без перебільшення майбутнє нашої цивілізації" [11]. Але нині такі спонтанні виходи водню із земних надр задіяти в енергетичному балансі практично неможливо. Необхідно розглядати можливості промислового виробництва водню.

Мотиваційним проявом пильної уваги до використання водню в енергетиці стало уявлення про нього як про ефективне та екологічно чисте паливо: теплота згоряння 140 МДж/кг (природного газу - метану до 50 МДж/кг), при спалюванні водню утворюється лише вода. Але водень – не енергоресурс, це проміжний енергоносіє, для одержання якого використовуються традиційні енергоресурси.

Проблема залучення водню до паливного циклу набула підвищеної актуальності, зараз публікується безліч спеціальних та популярних робіт. Розглядаються прогнози розвитку водневої енергетики з використанням "зеленого" водню (виробництво електролізом із води), "блакитного" водню (отримання з природного газу з попутним виходом CO_2). Виробництво та включення цього енергоносія в енергетику пов'язане з вирішенням цілого ряду проблем і можливих ризиків науково-технологічного, економічного, правового та організаційного характерів, що виникають при цьому [6].

Табл. 1.

Енергоресурс	Викиди CO_2 , г/кВт·годину, джерело:	
	[12]	[13]
Вугілля	860...1290	262...357
Нафта	689...890	219...264
Природний газ	460...1234	120...188
Сонячні фотоелементи	30...279	27...76
Гідроенергетика	16...410	6...65
Біомаса	37...116	3...13
Енергія вітру	11...75	3...13
Атомна енергія	9...30	2...6

Нині промисловий водень отримують конверсією традиційних вуглеводнів – газу, вугілля, нафти. Нарощування виробництва водню як палива з використанням такої технології призвело до збільшення викидів CO_2 - антропогенного фактора підвищення парникового ефекту. Для отримання водню електролізом води пропонується використовувати переважно електроенергію атомних електростанцій під час провалу їх навантаження. Атомна енергія, а також ВДЕ, відносяться до умовно екологічно чистих та низьковуглецевих енергоресурсів у порівнянні з іншими. Нижче наведено дані емісії енергоресурсів в еквіваленті CO_2 для повного життєвого енергетичного циклу при виробництві 1 кВт·години електроенергії, дані діапазону значень першого стовпця наведено в [12], другого стовпця – в [13].

Як видно, дані двох літературних джерел суттєво відрізняються, що можна пояснити різним ступенем глибини аналізу складових повного енергетичного циклу, проте переконливо підтверджують положення про "низьковуглецевість" атомної енергетики. Усі АЕС світу сумарно заощаджують 2,0 млрд. т CO_2 на рік. До відома, всі ліси планети щорічно поглинають 2,6 млрд. т CO_2 [14]. Якщо у світі середній показник викидів CO_2 становить 475 г/кВт на годину, то ядерна енергетика України у 2021 р. забезпечила непотрапляння в довкілля понад 40 млн. т CO_2 (приблизно по 1 т на одного мешканця країни) [15]. Таким чином, атомну енергетику можна обґрунтовано віднести до умовно "зеленої" енергетики.

Можливості використання АЕС для одержання водню (декарбонізації) були підтримані Паризькою угодою щодо клімату. Але така технологія потребує свого правового поля. Необхідно провести уніфікацію положень, що регулюють відносини у галузі виробництва, транспортування, зберігання водню, що отримується на АЕС. Для цього необхідно вдосконалити правове регулювання

в галузі використання атомної енергії на міжнародному та національних рівнях, виділивши галузі, що потребують уніфікації [16].

Крім електроенергії АЕС для отримання водню електролізом води розглядаються використання електроенергії інших типів електростанцій, зокрема умовно «екологічно чистих» сонячних електростанцій. Певні сподівання отримання водню пов'язують із розробкою фотокаталізаторів, що розщеплюють воду під впливом сонячного світла, і успіхами в мікробіології - створенням штамів мікроорганізмів, що генерують водень. Але всі ці принципово можливі технології поки що далекі від техніко-обґрунтованих інженерних рішень. Поки що також не вирішено проблем транспортування та зберігання водню.

Принципові проблеми, пов'язані з використанням відновлюваних енергоресурсів та водню, можливі ризики при залученні їх у паливному циклі, доказово аргументовано наведені у [6].

Наявні науково-технічні техніко-економічні та екологічні проблеми, властиві водневої енергетики, не дозволяють зробити висновок про залучення до паливного циклу такого енергоносія як водень – справа найближчого майбутнього. Для обережного оптимізму необхідно вирішити низку проблем. Виробництво водню електролізом пов'язують із прогресом освоєння термоядерної енергетики, терміни створення якої поступово зсуваються, хоча успіхи останнього часу вражають [17].

В Україні, незважаючи на воєнні виклики, залишається актуальною проблема розвитку низьковуглецевої енергетики, у тому числі й водневої енергетики. Керівництвом ГТС України підписано угоду з Європейською водневою магістраллю щодо інтеграції інфраструктури (транспортування водню трубопроводом до кінцевих споживачів). “В ініціативі беруть участь 31 газові компанії у всій Європі. Україна має великий потенціал та може стати водневим хабом Європи.” [18]. Зовсім недавно опубліковано проект правил для «повністю відновлюваного» водню (COMMISSION DELEGATED REGULATION (EU). <https://www.euractiv.com/wp-content/uploads/sites/2/2022/05/090166e5ec7b7157.pdf>) як додаток до Директиви ЄС Renewable Energy Directive 2018/2001.

17 лютого 2022 р. відбулася наукова сесія Загальних зборів НАН України з проблем формування та реалізації моделі розвитку низьковуглецевої економіки України (Вісник НАНУ, №3. 2022). Серед інших проблем було розглянуто органічно пов'язані з використанням в економіці та енергетиці ВДЕ, водню, а саме: проблеми

економіки в імперативах низьковуглецевого розвитку [19], енергетики та навколишнього середовища [20], перетворення енергетики України в інтелектуальну екологічно безпечну систему [21], водневої енергетики у світі та в Україні.

Стосовно вітчизняних досліджень та перспектив використання водню зазначимо, що в НАН України успішно ведеться широкий комплекс робіт із даної проблематики, починаючи із 2006 р. відбулися наукові програми, зокрема, «Фундаментальні проблеми водневої енергетики» (2006-2010 рр.), «Водень в альтернативній енергетиці та новітніх технологіях» (2011-2015 рр.), «Фундаментальні аспекти відновлювано-водневої енергетики і паливно-комірчастих технологій» (2016-2018 рр.), а в 2019-2021 рр. виконувалась чергова цільова програма фундаментальних досліджень «Розвиток наукових засад отримання, зберігання та використання водню в системах автономного енергозабезпечення». По її завершенні отримані наступні результати (згідно матеріалів анотованого звіту):

- встановлено, що щорічне накопичення у світі більше 1 млрд. тон багатокомпонентних органічних відходів потребує розробки ефективних шляхів їх утилізації. Зокрема, використання багатокомпонентних харчових відходів як субстрату для отримання енергоносіїв, в т.ч. молекулярного водню та метану, є одним із найбільш перспективних підходів. Було розроблено двоетапну схему, що забезпечувала ефективне зброджування твердих харчових відходів з отриманням водню, а також доочищення фільтрату від розчинених органічних сполук (жирні кислоти і спирти) шляхом їх аеробного окиснення або метанового зброджування. Отримані результати є перспективними для промислового застосування з метою розвитку альтернативної енергетики та очищення довкілля (Інститут мікробіології і вірусології ім. Д.К. Заболотного НАН України).

- проведені експериментальні дослідження переробки донних мулів станцій водоочищення і отримання синтез-газу, створено дослідний зразок технологічної лінії, що є передумовою для досягнення високої енергетичної ефективності процесу плазмопарової конверсії токсичних осадів (Інститут газу НАН України).

- проведено експериментальні дослідження отримання водню (та кисню) методом електролізу при електроживленні на основі інсоляції. Визначено шляхи підвищення продуктивності роботи електролізера з сонячним фотоелектричним перетворювачем. (Інститут проблем машинобудування ім. А.М.Підгорного НАН України).

- проведено визначення хімічного складу та апробований метод одержання каталізатора конверсії біоетанолу для перспективних систем автономного енергозабезпечення на основі водню та паливних комірок. Визначено склад вихідних сумішей та умов роботи реактора для одержання водню необхідної чистоти з використанням сировини з різним вмістом етанолу і вищих спиртів та за умов роботи реактора при температурних 300-700 °С. Розроблено лабораторний макет генератора водню, який базується на запропонованій схемі з середньою продуктивністю 4,5 л H_2 /год без блоку очистки технічного водню та з використанням теплообмінника-економізера для утилізації теплоти відхідного газу (Інститут фізичної хімії ім. Л.В. Писаржевського НАН України).

- з метою оптимізації характеристик сонячних комірок і досягнення високої ефективності отримання та акумулювання «сонячного» водню виготовлені полікристалічні фотоаноди з застосуванням електрохімічного методу, які були випробувані в фотоелектрохімічній комірці з накопиченням водню. В якості катода фотоелектрохімічної комірки використані воденьсорбуючі матеріали на основі інтерметалевих з'єднань типу AB_5 (на базі $LaNi_5$). Розроблено конструкцію фотоелектрохімічної паливної комірки з модифікованим фотоелектродом і системою металогідрид/повітряний електрод, проведено їх випробування при опроміненні світлом та визначені перспективи їх практичного використання (Інститут загальної та неорганічної хімії ім. В.І. Вернадського НАН України, Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України).

- важливою складовою оцінки можливостей отримання водню шляхом електролізу є аналіз і оцінка водних ресурсів України. Суттєвим фактором є можливість використання морської води, опрісненої з використанням офшорних вітроелектростанцій. Розроблено технологічні схеми отримання водню в місцях будівництва сонячних, вітрових та геотермальних електростанцій. Аналіз транспортної галузі, металургійної та хімічної промисловості дозволили визначити обсяг внутрішнього ринку споживання водню на шляху до декарбонізації економіки і виконання Україною міжнародних зобов'язань щодо захисту довкілля (Інститут відновлюваної енергетики НАН України).

- визначальною складовою створення нових водневих енергоустановок з конверсією твердих органічних відходів є полігенерація (використання отриманого водню для одержання енергії, а вуглецю для створен-

ня комерційних продуктів). Проведено аналіз, видано пропозиції щодо можливості використання побічного продукту конверсії твердих органічних відходів у водень – вуглекислого газу для роботи полігенераційних когенераційних водневих енергоустановок з метою виробництва електроенергії, добрив, пластику, біопалив третього покоління, будівельних матеріалів, нановуглецю та ін. Проведено техніко-економічні розрахунки нових принципових технологічних схем конверсії твердих органічних відходів в збагачений воднем синтез-газ та чистий водень для теплових електричних станцій та хімічних заводів України (Інститут теплоенергетичних технологій НАН України).

- для вирішення комплексу проблем, що забезпечують створення раціональних конструкцій акумуляторів водню, використана модель, що описує нестационарний процес термосорбційної взаємодії металогідріда з воднем, яка дозволяє здійснити вибір гідридоутворюючого матеріалу з необхідними характеристиками зберігання водню. Визначено конструктивні розміри металогідридного акумулятора, його складових та розроблено регламент експлуатації акумулятора в залежності від інтенсивності зовнішнього теплового впливу (Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України; Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України).

- розроблено технологічний регламент на композитний матеріал для комбінованих високоємних ємностей для акумулювання, зберігання і використання водню, а також технічне завдання на розробку конструкції балонів для накопичення, зберігання і використання водню. Підібрані матеріали для комбінованих силових корпусів та розроблена техніка їх формування (Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України).

- як перспективні матеріали для збереження значної кількості водню було визначено сплави-композити на основі магнію. Важливим практичним завданням є швидкий та ефективний синтез гідриду магнію, який досягається механохімічним синтезом. Механохімічний помел у середовищі водню використовували як метод отримання гідридних нанокompозитів на основі магнію з добавками нанопорошків перехідних металів та їх оксидів. При тиску водню 1 атм із застосуванням термодесорбційної спектроскопії досліджено водневу ємність, термічну стійкість, кінетику десорбції водню з MgH_2 отриманих механічних сплавів. В результаті реактивного механічного помелу суміші $Mg+(10\text{ваг.}\% \text{ Ni, Ti})$ досягнута воднева ємність 6,1 % ваг. Встановлено: додавання до магнію Ni, Ti призводить до значного покращення

щення кінетики десорбції водню відповідно у 16 і 6 разів. Такі накопичувачі водню можуть бути рекомендовані для використання в стаціонарних умовах, в системах автономного енергозабезпечення, в комплексі з високотемпературними твердооксидними паливними комітками. Створена лабораторна металгідридна повітряна комітка, яка дозволяє проводити дослідження як повітряного, так і металгідридного електрода. Встановлено, що електроди зі сплавів $\text{La}_3\text{Ni}_{9.7}\text{Mn}_{0.5}\text{Al}_{0.3}\text{Co}$ легко активуються і досягають максимального значення розрядної ємності протягом 3-7 циклів. Всі сплави утворюють стійкі в відкритих системах гідриди (Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М.Францевича НАН України).

- було синтезовано нанокомпозити на основі MgH_2 з використанням 0,5...5 мол.% каталітичних добавок нано-Ti, нано- TiO_2 , $\text{Nd}_{0.5}\text{Ho}_{0.5}\text{FeO}_3$. Вибрані нанокомпозити були також протестовані як матеріали для генерування водню шляхом гідролізу у чистій воді та з додаванням хлоридів перехідних металів та лимонної кислоти (фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України).

- відзначено, що керамічна паливна комітка є одним з найперспективніших енергогенеруючих пристроїв, завдяки своїй високій ефективності, екологічності та здатності використання широкого вибору палива (водень, метан, природний газ тощо). Однак підчас тривалої експлуатації відбувається деградація матеріалів компонентів твердооксидних паливних коміток, що зумовлено впливом робочого середовища. Найбільшому його впливу піддаються аноди, які традиційно виготовляють з кераміки системи 8YSZ NiO, та з'єднувальні елементи (інтерконекти) з феритних сталей типу Crofer. Встановлено, що кераміка 8YSZ-NiO, отримана за технологією стрічкового лиття, є перспективнішою для виготовлення анодів-підкладок коміток, ніж одержана спіканням порошків. Вона має дрібніше зерно і одноріднішу структуру, через що її міцність підвищується на 63%. Показано, що для середньотемпературних (550...650 °C) коміток альтернативою сталям типу Crofer є композити на основі системи Ti-Al-C. Синтезовані порошки різними методами (гідротермальний методом і методом осадження) на основі діоксиду цирконію, стабілізованого комплексними стабілізуючими добавками, характеризуються в області температур (600-700 °C) високою іонною провідністю і можуть бути використані як тверді електроліти для низькотемпературних паливних коміток. Досліджено вплив надлишку марганцю в ком-

позитних катодних матеріалах для низькотемпературних (600 °C) твердих оксидних паливних елементів та їх властивості: фазовий склад, мікроструктуру, густину та електропровідність. Розроблено зразки низькотемпературних воднево-повітряних паливних коміток та їх батарей, до складу яких увійшли високопродуктивні мембранно-електродні блоки нового покоління. Виготовлено необхідні компоненти (деталі корпусу комбінованої паливної комітки, герметичні прокладки, мембранно-електродні блоки) автономного джерела живлення. Розроблено автономне джерело електроживлення на базі водневого генератора гідролізного типу та переносної батареї воднево-повітряних паливних коміток, в якому водень, що утворюється в генераторі в результаті взаємодії енергоакуюлюючих речовин на основі алюмінію з водою, живить паливні комітки. Розроблено каталізатори з високими експлуатаційними характеристиками та технологічні рішення для отримання водневого палива з використанням біогазу в якості вихідної сировини для потреб автономного енергозабезпечення на основі гібридних та високотемпературних паливних елементів (інститути НАН України: проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича; загальної та неорганічної хімії ім. В.І. Вернадського; фізико-механічний ім. Г.В. Карпенка; фізичної хімії ім. Л.В. Писаржевського).

На недавно проведений XXIII міжнародній науково-практичній онлайн-конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті» (19-20 травня 2022 р.) Інститутом відновлюваної енергетики НАН України було представлено проект Водневої стратегії України до 2050 р. [22], основною метою якої є перехід на нову чисту енергетичну систему, тобто перехід до безвуглецевої, екологічно безпечної, циркулярної економіки, що кореспондує із трендами розвитку академічної економічної науки [19]. Дорожня карта розвитку водневої енергетики України на період до 2035 року представлена в [23]. Один із шляхів розвитку водневої енергетики країни – це виробництво т.зв «зеленого» водню на основі ВДЕ, зокрема за допомогою вітрової енергетики [24] класичним шляхом електролізу води, в т.ч. морської [25]. Навіть самий песимістичний сценарій (згідно річних обсягів в 2035 р. виробництва електроенергії із інсоляції та з енергії вітру в обсязі 25 млрд. кВт·годин відповідно до Енергетичної стратегії України до 2035 р.) дає річне виробництво «зеленого» H_2 в оцінці об'єму 5,5 млрд. nm^3 . Згідно базового сценарію Водневої стратегії України в 2050 році виробництво електроенергії із вітру (встановлена потужність

460 ГВт) та інсоляції (70 ГВт) зросте до річного значення 1500 млрд. кВт·годин, що дозволить збільшити виробництво водню до річних обсягів 330 млрд. nm^3 [26].

Загалом політика низьковуглецевого розвитку економіки в період післявоєнного відновлення має бути спрямована на економічне зростання та покращення якості життя та повинна передбачати:

1. Підвищення енергоефективності економіки – основний чинник скорочення викидів парникових газів. Найбільший потенціал тут зосереджений у ЖКГ, тому що понад 40% енергоресурсів використовуються у цьому секторі енергетики. Технологічна реконструкція енергетичної галузі ЖКГ у період післявоєнного відновлення повинна бути спрямована на здійснення енергозабезпечення зруйнованих та пошкоджених житлових та громадських будівель на засадах підвищення енергоефективності, енергетичної безпеки, імпортозаміщення енергоресурсів, декарбонізації та дотримання європейського законодавства у сфері будівництва (будівлі 0-енергії, енергоактивні будівлі, пасивні будівлі, “розумні” будівлі, «зелені» будівлі). У США інвестиції у підвищення енергоефективності у будівлях у 2015-2021 рр. склали близько 65% загальної суми вкладень, рис. 3, [27].

2. Реалізацію сучасних інноваційних систем енергозабезпечення кінцевого споживача на основі високоефективної когенерації, “зелених” теплових насосів, високоефективного теплохолодопостачання, використання ВДЕ, місцевих видів палива (включаючи товарні відходи сільського господарства), біоетанолу, біометану, синтетичного газу, водню.

3. Оцінку ризиків, що сповільнюють соціально-економічний розвиток та основні галузі економіки при реалізації заходів щодо зниження нетто-викидів пар-

никових газів на економіку, рівень та якість життя населення з розробкою заходів щодо адаптації економіки і населення до зміни клімату. Адже, як відображено в матеріалах проекту Постанови наукової сесії загальних зборів НАН України від 17.02.2022 р., «...Проведення ефективної державної політики та заходів, спрямованих на формування та реалізацію низьковуглецевої економіки України, є безальтернативним шляхом розвитку, який сприятиме скороченню обсягів антропогенних викидів газів та пом'якшенню кліматичних змін в Україні. Водночас необхідно чітко розуміти, що вуглецева нейтральність – це одна з цілей сталого розвитку, яку треба досягати не за будь-яку ціну, а за принципом «не нашкодь», з ретельними прорахунками можливих сценаріїв, дотримуючись при цьому балансу між боротьбою за екологію та національними інтересами. У першу чергу, у низьковуглецевому розвитку має бути споріднене економічне зростання та переформатування енергетичної системи на основі нових технологій, що мають на сьогодні високий рівень капіталомісткості, а також забезпечення принципів соціальної справедливості...»

Оптимальне рішення залучення в енергобаланс різних енергоресурсів та енергоносіїв полягає не в протиставленні їх один одному, а в розумному техніко-економічно та екологічно обґрунтованому поєднанні, що звичайно вимагає поглиблення та розширення наукових основ з теорії та практики проведення техніко-економічного аналізу енергетичних технологій з урахуванням сучасних інтелектуальних та обчислювальних можливостей у інноваційній цифровій економіці.

Автори висловлюють свою подяку член.-кор. НАН України Стрижаку П. за допомогу в отриманні інформації і написанні статті.

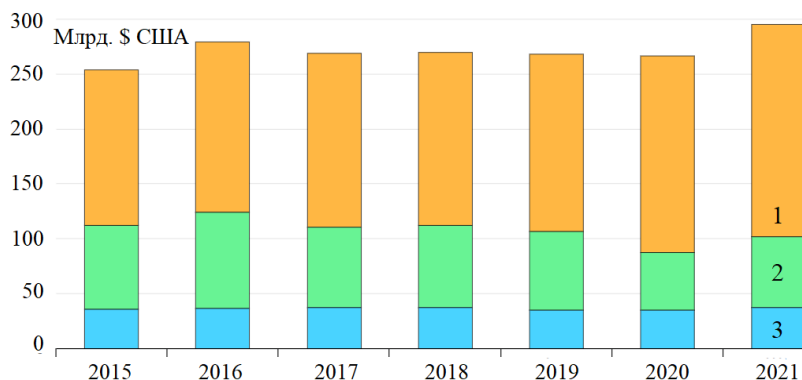


Рис. 3. Інвестиції в енергоефективність, 2015-2021 рр., (джерело: [27])

Позначення: 1 – будівлі (в 2021 р. – 193 млрд. дол. США), 2 – транспорт, 3 – промисловість

ЛІТЕРАТУРА

1. *Стратегія низьковуглецевого розвитку України до 2050 року* (https://mepr.gov.ua/files/docs/Proekt/LEDS_ua_last.pdf); «Про схвалення Концепції реалізації державної політики у сфері зміни клімату на період до 2030 р.» (Розпорядження КМ України від 7 грудня 2016 р. № 932-р); «Національна економічна стратегія на період до 2030 року» (Розпорядження КМ України від 3 березня 2021 р. №179); «Стратегія енергетичної безпеки на період до 2025 року» (Розпорядження КМ України від 4 серпня 2021 р. № 907-р.); Стратегія екологічної безпеки та адаптації до зміни клімату до 2030 р. (Розпорядження КМ України від 20 жовтня 2021 р. № 1363-р.); Звернення Верховної Ради України (Постанова ВР України 5 листопада 2021 року, № 1870-IX).
2. *REPowerEU: Joint European Action for more affordable, secure and sustainable energy*. COM(2022). 108 final. Strasbourg, 8.3.2022 <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2022%3A108%3AFIN>
3. *Порфирьев Б.Н.* Парадигма низкоуглеродного развития и стратегия снижения рисков климатических изменений для экономики // Проблемы прогнозирования, 2019, №2, - С. 3-13.
4. *Jacobson et al.* Impacts of Green New Deal Energy Plans on Grid Stability, Costs, Jobs, Health, and Climate in 143 Countries. *One Earth*, vol. 1, iss. 4. December 20, 2019, pp. 449-463. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2019.12.003>
5. *Порфирьев Б., Широков А., Колтаков А.* Стратегия низкоуглеродного развития перспективы: для экономики России // Мировая экономика и международные отношения, 2020, Т. 64, №9 – С. 15-25.
6. *Арутюнов В.С., Лисичкин Г.В.* Энергетические ресурсы XXI века: проблемы и прогнозы. Могут ли возобновляемые источники энергии заменить ископаемое топливо? // Успехи химии, 2017, 86 (8) – С. 771-804.
7. *П.Л. Капица.* Эксперимент, теория, практика. Москва: Наука, 1974, 288 с.
8. *Сывороткин В. Л.* Катастрофическая эпоха водородной дегазации // Редкие земли. — 2018. — № 9. — С. 32–39. <http://rareearth.ru/ru/pub/20170810/03395.html>
9. https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/gl_trend.html, https://gml.noaa.gov/webdata/ccgg/trends/global_trend.pdf
10. *Терез Э.И., Терез И.Э.* Реакция синтеза – основной источник внутренней энергии Земли // Вестник РАН, 2015, Т. 85, №3. – С. 240-246.
11. *Із зали засідань Президії НАН України 2 грудня 2015 року* // Вісник НАН України, 2016, №2. - С.13-17.
12. *Ханс-Хольгер Рогнер, Аршад Хан.* Сравнение источников энергии // Энергия: экономика, техника, экология, 1997, №3 – С. 8-14.
13. *А.П. Трофименко.* Екологічний вплив атомної енергетики та її сприйняття громадськістю // Праці міжнародної конференції “Енергетична безпека Європи. Погляд у XXI століття”, 22-25 травня, Київ, 2001 р. – С. 169-171.
14. *Forests and climate change*, IUCN (міжнародний союз охорони природи). <https://www.iucn.org/resources/issues-briefs/forests-and-climate-change>
15. *Носовський, А.В.* (2022). Ядерна енергетика України в контексті сталого розвитку: Доповідь на науковій сесії Загальних зборів НАН України 17 лютого 2022 року. Вісник Національної академії наук України, (3), 24–29. <https://doi.org/10.15407/visn2022.03.024>.
16. *Лисицин-Светланов А.Г., Романова В.В.* Правовые аспекты регулирования атомной энергетики как неотъемлемой части низкоуглеродной энергетической повестки // Вестник РАН, Т. 92, №2, 2022. – С.125-130. <https://www.elibrary.ru/contents.asp?id=47958164>.
17. *Чистая энергия в 70 млн градусов: искусственное солнце в Китае побilo все рекорды.* <https://tech.segodnya.ua/tech/chistaya-energiya-v-70-mln-gradusov-iskusstvennoe-solnce-v-kitae-pobilo-vse-rekordy-1594433.html>; Прорыв в ядерном синтезе совершили британские ученые. <https://skeptik.com.ua/proryv-v-yadernom-sintezе-sovershili-britanskіe-uchenye/>.
18. *Украина станет поставщиком водорода в Европу – ГТС строят коридор в Германию.* <https://economics.segodnya.ua/economics/enews/ukraina-stanet-postavshchikom-vodoroda-v-evropu-gts-stroyat-koridor-v-germaniyu-1575469.html>
19. *Гесць, В.М.* (2022). Економіка України в імперативах низьковуглецевого розвитку: Доповідь на науковій сесії Загальних зборів НАН України 17 лютого 2022 року. Вісник Національної академії наук України, (3), 8–17. <https://doi.org/10.15407/visn2022.03.008>.
20. *Басок, Б.І.* (2022). Енергетика і забруднення навколишнього середовища: Доповідь на науковій сесії Загальних зборів НАН України 17 лютого 2022 року. Вісник Національної академії наук України, (3), 30–36. <https://doi.org/10.15407/visn2022.03.030>.
21. *Кириленко, О.В.* (2022). Заходи та засоби перетворення енергетики України на інтелектуальну екологічно безпечну систему: Доповідь на науковій сесії Загальних зборів НАН України 17 лютого 2022 року. Вісник Національної академії наук України, (3), 18–23. <https://doi.org/10.15407/visn2022.03.018>.
22. *Бенменні М.* Воднева стратегія України / презентація, XXIII міжн. наук.-практ. онлайн-конф. «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті» (19-20 травня 2022 р.), <https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/Vodneva-Strategia-Cover.pdf>

23. Кудря С.О., Рєпкін Л.В., Яценко Л.В., Шинкаренко Л.Я., Ткаленко М.А. Концепція дорожньої карти розвитку водневої енергетики України на період до 2035 року // Відновлювана енергетика. 2019. № 4 (65), С. 22-28.

24. Kudria, S., Ivanchenko, I., Tuchynskiy, B., Petrenko, K., Karmazin, O., Riepin, O. Resource potential for wind-hydrogen power in Ukraine // International Journal of Hydrogen Energy, V. 46, №1, 2021, Pp. 157-168.

25. Кудря С.О., Яценко Л.В., Шинкаренко Л.Я., Ткаленко М.А. Опріснення морської води для отримання зеленого водню // Відновлювана енергетика. 2021. № 4 (67), С. 6-17.

26. Кудря С.О. «Зелений» водень: наука, освіта, технології, співпраця / презентація, XXIII міжн. наук.-практ. онлайн-конф. «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті» (19-20 травня 2022 р.),

27. *Energy Efficiency*, IEA 2021. 103 p. iea.blob.core.windows.net/assets/9c30109f-38a7-4a0b-b159-47f00d65e5be/EnergyEfficiency2021.pdf

LOW CARBON ENERGY 2. Hydrogen energy: problems, achievements, possible risks (review)**Basok B.I., Baseyev Ye.T.**

The Institute of Engineering Thermophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist str., Kyiv, 03057, Ukraine, basok@ittf.kiev.ua

<https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2022.6>

Ways to reduce the carbon capacity of Ukraine's economy through the active use of energy efficiency measures in energy, extensive use of renewable energy sources, in particular hydrogen, with possible problems and risks of transition to low-carbon energy. The aim of the work is to assess the contribution of hydrogen use in the perspective of achieving decarbonized energy of Ukraine, taking into account the advantages, available achievements and obstacles to the movement of the economy on this path. To this end, estimates of energy efficiency of primary energy resources according to the EROEI indicator, in particular, renewable energy sources; indicators of environmental friendliness of basic energy resources according to specific (per unit of energy) greenhouse gas emissions are given; IEA data on the volume of global investments in energy efficiency are presented.

The main scientific and technical results of recent times in the field of research on the processes of production, transportation and end use of hydrogen, obtained by teams from a number of institutes of the National Academy of Sciences of Ukraine. The problems of hydrogen energy are in the focus of close attention of scientists in the country. The use of Ukrainian nuclear power plants for hydrogen production is considered.

Particular attention is paid to the materials of the draft Hydrogen Strategy of Ukraine until 2050, according to which the volume of hydrogen production in the final period of implementation will be up to 330 billion nm³ annually.

The risks of formation and development of energy at RES are assessed, the optimal scenarios of the country's economic development are considered.

References 27, fig. 3, table 1.

Keywords: global warming, low carbon energy, renewable energy sources, hydrogen, risks.

1. *Strategy of low-carbon development of Ukraine until 2050* (https://mepr.gov.ua/files/docs/Proekt/LEDS_ua_last.pdf); «On approval of the Concept of implementation of state policy in the field of climate change for the period up

to 2030» (Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine of December 7, 2016 № 932-p); «National economic strategy for the period up to 2030» (Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine of March 3, 2021 №179); «Energy security strategy for the period up to 2025» (Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine of August 4, 2021 № 907-p.); Strategy for environmental safety and adaptation to climate change until 2030 (Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine of October 20, 2021 № 1363-p.); Appeal of the Verkhovna Rada of Ukraine (Resolution of the Verkhovna Rada of Ukraine of November 5, 2021, № 1870-IX).

2. *REPowerEU: Joint European Action for more affordable, secure and sustainable energy*. COM(2022). 108 final. Strasbourg, 8.3.2022 <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2022%3A108%3AFIN>

3. *Porfiriev B.N.* The paradigm of low-carbon development and the strategy for reducing the risks of climate change for the economy // *Problems of Forecasting*, 2019, №2, - P. 3-13.

4. *Jacobson et al.* Impacts of Green New Deal Energy Plans on Grid Stability, Costs, Jobs, Health, and Climate in 143 Countries. *One Earth*, vol. 1, iss. 4. December 20, 2019, P. 449-463. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2019.12.003>

5. *Porfiriev B., Shirov A., Kolpakov A.* Low-carbon development strategy perspectives: for the Russian economy // *World economy and international relations*, 2020, V, 64, №9 – P. 15-25.

6. *Arutyunov V.S., Lisichkin G.V.* Energy resources of the 21st century: problems and forecasts. Can renewable energy sources replace fossil fuels? // *Advances in Chemistry*, 2017, 86 (8) – P. 771-804.

7. *Kapitsa P.L.* Experiment, theory, practice. Moscow: Science, 1974, 288 p.

8. *Syvorotkin V.L.* Catastrophic epoch of hydrogen degassing // *Rare Lands..* — 2018. — № 9. — P. 32–39. <http://rareearth.ru/ru/pub/20170810/03395.html>

9. https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/gl_trend.html, https://gml.noaa.gov/webdata/ccgg/trends/global_trend.pdf

10. *Therese E.I., Therese I.E.* The fusion reaction is the main source of the Earth's internal energy // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*, 2015, V. 85, №3. – P. 240-246.

11. *From the meeting room of the Presidium of the National Academy of Sciences of Ukraine* December 2, 2015 // *Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 2016, №2. - P.13-17.

12. *Hans-Holger Rogner, Arshad Khan.* Comparison of energy sources // *Energy: economics, technology, ecology*, 1997, №3 – P. 8-14.

13. *Trofymenko A.P.* Environmental impact of nuclear energy and its perception by the public // Proceedings of the international conference "Energy Security of Europe. View in the XXI century", May 22-25, Kyiv, 2001 – P. 169-171.
14. *Forests and climate change*, IUCN <https://www.iucn.org/resources/issues-briefs/forests-and-climate-change>
15. *Nosovsky A.V.* (2022). Nuclear energy of Ukraine in the context of sustainable development: Report at the scientific session of the General Assembly of the National Academy of Sciences of Ukraine on February 17, 2022. Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine, (3), 24–29. <https://doi.org/10.15407/visn2022.03.024>.
16. *Lisitsin-Svetlanov A.G., Romanova V.V.* Legal Aspects of Nuclear Energy Regulation as an Integral Part of the Low-Carbon Energy Agenda // Bulletin of the Russian Academy of Sciences, V. 92, №2, 2022. – P.125-130. <https://www.elibrary.ru/contents.asp?id=47958164>.
17. *Clean energy of 70 million degrees: artificial sun in China broke all records.* <https://tech.segodnya.ua/tech/chistaya-energiya-v-70-mln-gradusov-iskusstvennoe-solnce-v-kitae-pobilo-vse-rekordy-1594433.html>; British scientists make breakthrough in nuclear fusion <https://skeptik.com.ua/proryv-v-yadernom-sinteze-sovershili-britanskie-ucheny/>.
18. *Ukraine will become a supplier of hydrogen to Europe – GTS are building a corridor to Germany.* <https://economics.segodnya.ua/economics/enews/ukraina-stanet-postavshchikom-vodoroda-v-evropu-gts-stroyat-koridor-v-germaniyu-1575469.html>
19. *Heyets V.M.* (2022). The economy of Ukraine in the imperatives of low-carbon development: An update on the scientific session of the National Academy of Sciences of Ukraine on February 17, 2022. Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine, (3), 8–17. <https://doi.org/10.15407/visn2022.03.008>.
20. *Basok B.I.* (2022). Energy and Environmental Pollution: Report at the Scientific Session of the General Meeting of the National Academy of Sciences of Ukraine on February 17, 2022. Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine, (3), 30–36. <https://doi.org/10.15407/visn2022.03.030>.
21. *Kyrylenko O.V.* (2022). Measures and means of transforming Ukraine's energy sector into an intelligent ecologically safe system: Report at the scientific session of the General Meeting of the National Academy of Sciences of Ukraine on February 17, 2022. Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine, (3), 18–23. <https://doi.org/10.15407/visn2022.03.018>.
22. *Banmenni M.* Hydrogen strategy of Ukraine / presentation, XXIII international scientific-practical online conf. "Renewable energy and energy efficiency in the XXI century" (May 19-20, 2022), <https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/Vodneva-Strategia-Cover.pdf>
23. *Kudrya S.O., Repkin L.V., Yatsenko L.V., Shinkarenko L.Ya., Tkalenko M.A.* The concept of the roadmap for the development of hydrogen energy in Ukraine for the period up to 2035 // Renewable energy. 2019. № 4 (65), P. 22-28.
24. *Kudria, S., Ivanchenko, I., Tuchynskyi, B., Petrenko, K., Karmazin, O., Riepin, O.* Resource potential for wind-hydrogen power in Ukraine // International Journal of Hydrogen Energy, V. 46, №1, 2021, P. 157-168.
25. *Kudrya S.O., Yatsenko L.V., Shinkarenko L.Ya., Tkalenko M.A.* Desalination of sea water to obtain green hydrogen // Renewable energy. 2021. № 4 (67), P. 6-17.
26. *Kudrya S.O.* "Green" hydrogen: science, education, technology, cooperation / presentation, XXIII international scientific-practical online conf. "Renewable energy and energy efficiency in the XXI century" (May 19-20, 2022)
27. *Energy Efficiency*, IEA 2021. 103 p. iea.blob.core.windows.net/assets/9c30109f-38a7-4a0b-b159-47f00d65e5be/EnergyEfficiency2021.pdf

Отримано 15.06.2022

Received 15.06.2022