

# ДЕРЖАВНЕ РЕГУЛЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИКОЮ ЯК ПРИРОДНОЮ МОНОПОЛІЄЮ

ISSN 2522-4344 (Online), ISSN 1562-8965 (Print). The problems of general energy, 2020, 1(60): 66–73  
doi: <https://doi.org/10.15407/pge2020.01.066>

УДК 620.9:621.311:  
662.71:662.63:544.478

**О.М. ДУДНИК**<sup>1</sup>, канд. техн. наук, ст. наук. співр., ORCID: 0000-0002-9832-1536

**Н.І. ДУНАЄВСЬКА**<sup>1</sup>, докт. техн. наук, ст. наук. співр., ORCID: 0000-0003-3271-8204

**І.С. СОКОЛОВСЬКА**<sup>2</sup>, канд. техн. наук, ORCID: 0000-0003-1959-9837

<sup>1</sup> Інститут вугільних енерготехнологій НАН України, вул. Андріївська, 19, м. Київ, 04070, Україна

<sup>2</sup> Інститут загальної енергетики НАН України, вул. Антоновича, 172, м. Київ, 03150, Україна

## РОЗВИТОК СВІТОВОГО РИНКУ ЕНЕРГОУСТАНОВОК НА ПАЛИВНИХ ЕЛЕМЕНТАХ. СТВОРЕННЯ НОРМАТИВНОЇ БАЗИ ВОДНЕВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

*Наведено основні показники та переваги енергоустановок на паливних елементах (ЕУПЕ) та світовий об'єм їх застосування для різних областей промисловості. Загальна електрична потужність ЕУПЕ, вироблених у 2019 р., порівняно з 2009 р. збільшилась більше ніж в 11 разів – до 1100 МВт. Показано роль водневої інфраструктури для створення водневої економіки. Проаналізовано стан робіт на міжнародному рівні та показано комплексність і складність завдань зі стандартизації стосовно водневої енергетики. Обґрунтовано необхідність створення відповідної бази нормативних документів в Україні на основі гармонізації міжнародних стандартів.*

*Ключові слова:* водень, паливні елементи, енергетична установка, стандартизація.

Основними проблемами розвитку енергетики в наш час є необхідність зменшення шкідливих викидів та викидів парникових газів, використання відновлюваних джерел енергії, впровадження нових енергоефективних технологій, до яких належать технології водневої енергетики. Технології водневої енергетики створюються для використання хімічної енергії водню з метою виробництва електричної, теплової та інших видів енергії. Водень, як правило, є продуктом термохімічних процесів конверсії різних видів органічного палива та їх відходів, а також електролізу води та водяної пари. Крім того, в різних частинах світу знайдено поклади викопного водню, який також може бути використаний у промислових масштабах. Воднева енергетика поділяється на децентралізовану та централізовану.

Децентралізована автономна воднева енергетика базується на використанні водню, одержаного з використанням поновлювальних джерел енергії сонця, вітру, біомаси, твердих органічних відходів та викопних органічних палив для одержання різних видів енергії безпосередньо на місці розташування енергетичних установок. Для ви-

робництва електроенергії, як правило, використовуються новітні високоефективні екологічно чисті енергетичні установки на паливних елементах.

Централізована воднева енергетика базується на використанні водню, який надходить з газотранспортних систем поставок чистого водню та в суміші з природним газом. Крім того, як один з варіантів постачання водню розглядається використання трубопроводів рідинного органічного палива з хімічно зв'язаним воднем. Водень після одержання на різних установках конверсії не використовується безпосередньо автономним споживачем, а надходить в існуючі чи нові централізовані системи постачання та розподілення різних видів палива.

В енергетичних системах використовується новий енергоносіє – водень, який виробляється безпосередньо з використанням існуючих джерел енергії в різних країнах світу зі зниженням впливу постачання імпортованих видів газоподібного, рідинного та твердого видів палива на економіку цих країн. Зниження впливу постачання імпортованого палива на економіку України є дуже важливим фактором для її національної безпеки та існування газотранспортних та нафтових систем постачання палива в умовах можливої небезпечності зниження їх наповнення.

© О.М. ДУДНИК, Н.І. ДУНАЄВСЬКА, І.С. СОКОЛОВСЬКА, 2020

Актуальність розроблення та впровадження енергоустановок на паливних елементах (ЕУПЕ) пояснюється їх перевагами порівняно з традиційними енергетичними установками: висока енергоефективність (завдяки прямому перетворенню хімічної енергії палива в електроенергію), екологічна чистота (необхідна попередня очистка газу для роботи ЕУПЕ), можливість самостійного високоефективного децентралізованого використання (низька потужність та висока електрична ефективність), надійність та низький рівень шуму. ЕУПЕ – це повністю замкнута енергоустановка, в якій не використовується складне обладнання, яка має малу кількість рухомих частин та забезпечує надійність та якість електричного струму в разі зміни електричного навантаження. Для використання в ЕУПЕ біомаси та твердих органічних відходів необхідна попередня газифікація твердого палива в чистий синтез-газ, збагачений воднем, або чистий водень. Електричний ККД до 60% можна досягти, використовуючи високотемпературні твердооксидні паливні елементи як компонент теплової електростанції з внутрішньоцикловою газифікацією твердого палива [1, 2].

Метою даної роботи є аналіз нових енергетичних установок на ПЕ з визначенням пріоритетів їхнього використання в різних областях промисловості та нормативної бази водневої енергетики для розроблення, вдосконалення та впровадження сучасних водневих енерготехнологій в світі та в Україні.

На рис. 1 показано основні електрохімічні реакції, які відбуваються в паливних елементах (ПЕ)

під час прямого перетворення хімічної енергії палива в електричну енергію постійного струму, основні типи електролітів та робочі температури в паливних елементах. Паливні елементи класифікуються за робочою температурою та типом електроліту: низькотемпературні (з лужним та полімерним електролітом), середньотемпературні (з фосфорно-кислотним електролітом) та високотемпературні (з розплавленим карбонатним електролітом (РКЕ), з твердооксидним електролітом (ТОПЕ)).

За останні 10 років спостерігається світова тенденція значного збільшення впровадження ЕУПЕ в різних областях промисловості. Загальна електрична потужність ЕУПЕ, вироблених у 2019 р., порівняно з 2009 р. збільшилась більше ніж в 11 разів до 1100 МВт [3, 4]. Загальна електрична потужність енергоустановок на паливних елементах (ПЕ), проданих у 2018 р., становила 803,1 МВт: 29,86% для стаціонарного використання, 70,05% – для транспорту, 0,08% – портативні енергоустановки. В перерахунку на загальну енергетичну потужність у 73,35% енергоустановок, проданих у 2018 р., використано водневі полімерні паливні елементи (з протонобімною мембраною), 12,12% – фосфорно-кислотні паливні елементи, 11,33% – твердооксидні паливні елементи (ТОПЕ), 3,14% – паливні елементи з розплавленим карбонатним електролітом, 0,06% – інші (полімерні з прямим перетворенням метанолу та лужні ПЕ). Виробництво ЕУПЕ у 2018 р. становило 75 тис. одиниць. Загальна електрична потужність ЕУПЕ, вироблених у 2018 р. в Азії (Японія, Південна Корея, КНР, Сінгапур, Тай-



Рис. 1. Принцип дії паливних елементів

вань та ін.) становила 343 МВт, в Південній Америці – 415 МВт, в Європі – 43,4 МВт, в ін. країнах світу – 1,4 МВт [5].

У світі в 2019 р. (в перерахуванні на електричну потужність) продано на 40% (на 321 МВт) більше ЕУПЕ ніж у 2018 р. В 2019 р. збільшилась продаж ЕУПЕ в Європі до 69 МВт [3].

Для транспортного використання, в основному, використовуються електрохімічні генератори на полімерних паливних елементах з протонобмінною мембраною (ЕХГ ПЕПМ) [6]. На Північну Америку припадає близько двох третин щорічних продажів водневих легких автомобілів на ЕХГ ПЕПМ: Toyota Mirai, Toyota Tundra pick-up та Hyundai Nexa. З 2015 до 2018 р. тільки в США продано 4412 водневих гібридних автомобілів Toyota Mirai, які працюють на ЕХГ ПЕПМ [7]. Електричний ККД водневого ЕХГ становить до 83%, електрична потужність ЕХГ – до 115 кВт [8]. Загальна електрична потужність ЕХГ на ПЕ, встановлених на автомобілях Toyota Mirai та проданих в США з 2016 до 2018 р., становить 507 МВт. Підвищений продаж водневих автомобілів в Північній Америці забезпечується існуванням інфраструктури водневих заправних станцій (наприклад, в Каліфорнії, США). Значне застосування ЕХГ ПЕПМ знайшло на водневих муніципальних автобусах, навантажувачах, вантажівках, потягах та морських судах, автомобілях швидкої доставки пошти, продуктів та ін. Розвиток муніципальних водневих автобусів є пріоритетом для розвинутих міст світу з метою зниження шкідливих викидів та підтримується промислово-розвинутими державами. Так, наприклад, субсидія на придбання одного водневого автобуса в КНР становить 500 тис. юанів (70 тис. дол. США). В Японії та КНР електричні транспортні засоби на електрохімічних генераторах з паливними елементами, які мають високу енергоефективність, малу вагу та високий пробіг (до 800 км), розглядаються як перспективна альтернатива для заміни існуючого електричного транспорту на акумуляторах та гібридних енергоустановках (на електричних акумуляторах, двигунах внутрішнього згоряння та дизель-генераторах).

Розвиток існуючої водневої інфраструктури є пріоритетним напрямом розвитку економік країн ЄС, Японії, США та КНР. На даний час в Європі загальна протяжність водневих трубопроводів становить 1600 км, а загальне виробництво чистого водню 90 млрд м<sup>3</sup>/рік. Сьогодні в світі для забезпечення автотранспорту воднем працює 369 автозаправних станцій: в Європі – 152, в Азії – 136, в Америці – 80, Австралії – 1 [9].

У світі продовжується випробування та впровадження новітніх високоефективних енергетичних установок, в яких використовується гібрид

двох енерготехнологій: прямого перетворення енергії палив в ЕХГ на високотемпературних паливних елементах (ЕХГ на ВПЕ) з допаленням одержаних газів у каталітичній камері згоряння та використанням теплової енергії продуктів згоряння під тиском у газотурбінних енергоустановках (ГТУ). Теплова енергія продуктів згоряння після ГТУ використовується для підігрівання повітря та газів в рекуперативних теплообмінниках перед ЕХГ ВПЕ, опалення та гарячого водопостачання [10, 11]. Електричний ККД гібридних енергетичних установок залежить від виду вихідного палива, потужності енергетичних установок й становить від 40 до 65%. Високий електричний ККД досягається завдяки прямому перетворенню хімічної енергії палива в електричну енергію в ЕХГ на ВПЕ та одержанню електроенергії в ГТУ. Коефіцієнт надлишку повітря для роботи гібридних енергоустановок становить від 3,0 до 5,0 [12].

В університеті Кюсю (Японія) випробувано нову гібридну установку ЕХГ на трубчатих твердооксидних ВПЕ з мікро ГТУ загальною електричною потужністю 250 кВт компанії «Мітсубісі Хітачі Пауе Системс Лтд». Енергоустановка займає площу 40 м<sup>2</sup>. Під час роботи енергетичної установки на міському газі її електричний ККД в перерахунку на вищу теплоту згоряння палива становив 55% [13]. Проекти ЕХГ на ВПЕ з мікро-ГТУ компанії «Мітсубісі Хітачі Пауе Системс Лтд» реалізуються на заводі «Мотомачі» корпорації «Тойота Мотор», заводі «Комакі» корпорації «НЖК Спарк Плаг», станції «Сенджу Техно» компанії «Токіо Газ» та в технологічному центрі корпорації «Тайсей» [14].

Співробітники Бранденбурзького технологічного університету (Німеччина) оцінили можливості нових підходів щодо удосконалення системи ЕХГ з паровим риформінгом газів на анодах планарних ВПЕ та з використанням мікро-ГТУ [15].

Виробництво «зеленого» водню з використанням відновлюваних джерел енергії (сонця та вітру) допомагає стимулювати інтерес до розроблення та впровадження паливних елементів. У світі і в Україні використання процесів електролізу для одержання водню з води з використанням енергії сонця і вітру розглядається як можливість для декарбонізації промисловості. Такий підхід є рушійною силою в енергетичній політиці та отриманні інвестицій. Електроліз води був важливим джерелом водню з моменту його індустріалізації в 1800-х рр. Але дешевий природний газ значною мірою витіснив його з ринку виробництва водню. Зі збільшенням частки відновлюваних джерел енергії у виробництві електроенергії за останні кілька років інтерес до електролізу води відновився. Збільшується кількість компаній, які виготовляють електролізери для водневих

автозаправних станцій та переробних заводів (AkzoNobel, Voestalpine, Yara International, Shell та ін.). З'явилися нові анонси проєктів та платформ, мета яких створення систем 100 МВт +. Загальна потужність електролізерів збільшується завдяки паралельному підключенню електролізерів. Так, наприклад, для досягнення загальної електричної потужності 100 МВт електролізерів HGASXMW з полімерними мембранами компанії «ITM Power» (Великобританія) необхідно підключення 20 таких електролізерів. Найбільшими за потужністю є лужні електролізери, що працюють під тиском. Лужні електролізери компанії «HydrogenPro» (Норвегія) використано для будівництва електролізного заводу 5 x 100 МВт Дюнкерк. На даний час потужність заводів з виробництва електролізерів не може забезпечити існуючий ринок енергоустановок на паливних елементах. Тому будуються та заплановані для будівництва нові заводи з виробництва електролізерів. Компанія «Nel» (Норвегія) буде найбільший у світі завод з виробництва електролізерів (360 МВт/рік). Електролітичний водень поки що залишається дорогим. Бар'єрами для широкого застосування електролітичних установок є ціна електроенергії та низький коефіцієнт використання потужності [5]. Необхідно подальше зниження вартості обладнання та обслуговування сонячних та вітрових електростанцій, а також впровадження новітніх технологій акумулювання водню та електричної енергії.

У світі виробництво водню для забезпечення електроенергією та теплом досліджується на енергетичних установках, які працюють як автономно, так і для централізованих мереж постачання енергії. Важливим питанням для ефективного вирішення проблеми добових та сезонних навантажень для опалення та гарячого водопостачання є існування розвинутої інфраструктури теплопостачання (центрального опалення) та газових мереж. У разі недостатності природного газу в транспортній інфраструктурі його постачання, в світі розглядаються декілька сценаріїв використання існуючих централізованих систем без їхнього змінення: збільшення виробництва природного газу; додаткове завантаження системи біоприродним газом з біогазових заводів; додавання в природний газ водню (до 10 (об.) % в Німеччині); додавання метану, одержаного завдяки каталітичній конверсії водню та вуглекислого газу (який одержується під час використання викопних палив) [16]. Існуюча система постачання природного газу може бути поступово змінена зі збільшенням вмісту водню в суміші газів, що надходить користувачам [17].

В Інституті вугільних енерготехнологій НАН України проведено цикл досліджень з конверсії вугілля, біомаси та твердих органічних відходів з

метою одержання водню [18–20]. Проведено розрахунки системи спалювання водню з використанням когенераційної установки для одержання тепла в разі теплової потужності котла на опалення 10 кВт з метою визначення необхідної витрати водню, який потрібно буде накопичити в теплому пору року для спалювання з використанням повітря в опалювальний сезон. В результаті одержано такі показники роботи: термічний ККД котла – 94,8%; витрата водню – 3,5 нм<sup>3</sup>/год.; витрата повітря – 8,4 нм<sup>3</sup>/год.; склад продуктів згоряння, об. %: H<sub>2</sub>O – 34,7, N<sub>2</sub> – 65,3; вихід води – 2,8 кг/год.; витрата водню за опалювальний сезон (3600 год. роботи за постійного теплового навантаження котла на опалення 10 кВт) – 1,1 т. Після конденсації водяної пари на когенераційній установці одержується, крім енергії, також вода і азот.

В Японії виконується програма ENE-FARM, яка передбачає субсидії на придбання побутових когенераційних систем на паливних елементах для одержання електрики та гарячої води. На кінець 2018 р. кількість придбаних побутових когенераційних систем на паливних елементах становила близько 300 тис. одиниць. У 2018 р. приріст встановлення когенераційних установок становив 50 тис. одиниць [5]. Використовуються когенераційні установки «Toshiba», «Panasonic» та «Aisin Seiki» електричною потужністю 700 Вт кожна (з електричним ККД від 39 до 52%) з бойлером для одержання гарячої води ємністю 200, 140 та 28 літрів, вагою 86, 88 та 100 кг, вартістю зі встановленням 1630000, 1600000 та 1785000 йен (15, 14,74 та 16,44 тис. дол. США) відповідно. За даними Інституту Battelle Memorial (США) [21] вартість виробництва когенераційних енергоустановок з полімерними електролітами залежить від потужності та кількості виробництва когенераційних установок. За електричної потужності когенераційної установки на полімерних паливних елементах 1 кВт вартість матеріалів та обладнання для однієї енергоустановки без збирання та тестування становить: 17,07 тис. дол. США (в разі виробництва 100 енергоустановок за рік) та 8,37 тис. дол. США (в разі виробництва 50 тис. енергоустановок за рік). За електричної потужності когенераційної установки на твердооксидних паливних елементах 1 кВт вартість батареї ПЕ та допоміжного обладнання однієї енергоустановки без збирання та тестування становить 9,916 тис. дол. США (в разі виробництва 50 тис. енергоустановок за рік). До 2030 р. в Японії передбачена реалізація 5,3 млн міні-когенераційних енергоустановок на паливних елементах [22].

За останній час значного успіху у впровадженні стаціонарних енергетичних установок на паливних елементах досягнуто в Південній Кореї. Загальна електрична потужність енергоуста-

новок на паливних елементах становить близько 300 МВт. Розвиток даного сектору енергетики Південної Кореї розпочався завдяки введенню стандарту для відновлювальної енергетики (Renewable Portfolio Standard, RPS). Цей стандарт зобов'язує державних та незалежних виробників електроенергії, які мають електричні станції загальною електричною потужністю більше ніж 500 МВт, збільшити частку вироблення електроенергії за рахунок відновлюваних та нових технологій (включаючи паливні елементи та акумуляторні батареї) з 2% у 2011 р. до 10% до 2023 р. В рамках цього плану «Korea Southeast Power Company» збудувала трьохповерховий парк «Power Tower» (з виробленням 1 МВт електроенергії на кожні 73 м<sup>2</sup>) в м. Бунданзі з використанням енергоустановок на твердооксидних паливних елементах загальною електричною потужністю 8,35 МВт. Крім того, парк енергетичних установок на паливних елементах з фосфорно-кислотними паливними елементами (виробництва компанії «Doosan») встановлено компанією «Korea Hydro & Nuclear Power» на електростанції в м. Пусан. Електростанція має електричну потужність 31 МВт та призначена для забезпечення електроенергією 71,5 тис. будинків. У м. Хвасон (Південна Корея) запущено найбільший в світі зелений парк енергоустановок на паливних елементах (Gyeonggi Green Energy fuel cell park). Використано 21 енергоустановку на паливних елементах з розплавленим карбонатним електролітом (DFC@3000) потужністю 2,8 МВт кожна. Парк енергоустановок електричною потужністю 58,8 MW має електричний ККД 47%. До 2022 р. в Південній Кореї заплановано збільшення загальної потужності енергоустановок на паливних елементах до 800 МВт [23].

У світі продовжуються роботи з використання продуктів конверсії біомаси та твердих органічних відходів у енергетичних установках на паливних елементах. Так, наприклад, в рамках виконання проекту HiEff-BioPower «Розробка нової високоефективної та паливної гнучкої середньомасштабної ТЕЦ, заснованої на газифікації біомаси з нерухомим шаром та ТОПЕ» по гранту № 727330 (2016–2020 рр.) програми ЕС досліджень та інновацій Horizon 2020 розробляється нова технологія для створення енергетичних когенераційних установок електричною потужністю від 1 до 10 МВт із застосуванням газифікатора щільного шару з висхідним потоком газу для біопалива (деревні гранули, дрова та ін.), нової компактною системи для очищення газу та ЕХГ на ТОПЕ [24].

Для широкого практичного впровадження енергоефективних та екологічно чистих водневих технологій, зокрема виробництва чи імпортування обладнання з подальшою їх сертифікацією, необхідна відповідна база нормативних до-

кументів, які мають охоплювати весь життєвий цикл ЕУПЕ та стосуватись допоміжного обладнання, а також сприяти розвитку інфраструктури водневої енергетики.

З метою вирішення цих завдань на міжнародному рівні введено нові розділи у Міжнародний класифікатор стандартів (ICS), якому відповідає Український класифікатор нормативних документів ДК 004:2008 (ICS:2005, MOD), а саме: 27.070 «Паливні елементи» (“Fuel cells”) та 27.075 «Водневі технології» (“Hydrogen technologies”) [25]; створено міжнародний комітет стандартизації ISO/TC 197 («Водневі технології») та міжнародний (IEC TC/SC TC 105) і європейський (CLC/SR 105) комітети стандартизації «Технології паливних елементів» (“Fuel cell technologies”) [26–28].

До сфери діяльності ISO/TC 197 «Водневі технології» належать системи і пристрої для виробництва, зберігання, транспортування, вимірювання та використання водню. Створено 12 робочих груп та дві спільні робочі групи з комітетами ISO/TC 022 «Дорожні транспортні засоби» (підкомітет ISO/TC 22/SC 4 «Особливості газоподібних палив») та ISO/TC 158 «Аналізування газів» для розроблення стандартів на різне обладнання станцій для заправки газоподібним воднем наземних транспортних засобів; паливні баки з газоподібним воднем для наземних транспортних засобів; вимоги до якості водневого палива та його контролю; основні положення тощо щодо безпеки водневих систем тощо. На сьогодні в компетенції ISO/TC 197 чинних 17 стандартів і ще 5 проектів, з них код 27.075 має стандарт ISO 19882 щодо газоподібного водню стосовно вимог до термічно активованих пристроїв для скидання тиску для паливних контейнерів з воднем під тиском для застосування на транспорті [26].

На європейському рівні стосовно водневих технологій чинними є стандарти: EN 17124, який визначає характеристики водневого палива та гарантію його якості для використання в дорожніх транспортних засобах на паливних елементах з протонно-обмінною мембраною (ПОМ), та EN 17127, який визначає мінімальні вимоги для забезпечення сумісності загальнодоступних точок дозаправки воднем дорожніх транспортних засобів [29].

IEC TC/SC TC 105 та CLC/SR 105 «Технології паливних елементів» розробляють стандарти щодо застосування паливних елементів у різних енергоустановках (стаціонарних, переносних, пересувних, мікро), системах акумуляування енергії тощо [27, 28].

На початок 2020 р. чинними є 20 міжнародних стандартів серії IEC 62282 щодо технологій паливних елементів, розроблених IEC/TC 105, 14 з яких прийняті CLC/SR 105. Ці стандарти ре-

глантують: термінологію; вимоги до модулів паливних елементів; вимоги щодо безпечності, установлення та методи випробувань для визначення експлуатаційних характеристик стаціонарних енергоустановок на паливних елементах; вимоги до малих стаціонарних енергоустановок на паливних елементах з комбінованим виробництвом електроенергії та тепла; вимоги щодо безпечності переносних енергоустановок на паливних елементах; вимоги щодо безпечності, взаємозамінності паливних картриджів та методи випробування для визначення експлуатаційних характеристик мікро-енергоустановок на паливних елементах; методи випробування паливних елементів з протонобмінною мембраною, методи випробування технічних характеристик окремих та батарей твердооксидних паливних елементів; вимоги до мікро-енергоустановок на паливних елементах, у т.ч. взаємозамінності даних, вимоги до систем акумулювання енергії з використанням модулів твердооксидних паливних елементів та паливних елементів з протонобмінною мембраною у режимі реверсу, а також методи оцінювання екологічних характеристик енергоустановок на паливних елементах з урахуванням життєвого циклу тощо [27, 28].

З 2016 р. у рамках міжнародного проекту щодо паливних елементів та водню Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU) [30] розпочато декілька програм як на національному, так і на рівні ЄС, які включають нові заходи щодо стандартизації вироблення водню за допомогою електролізу та транспортування, розподілу й використання цього водню в чистому вигляді або як домінуюча суміш природного газу (H<sub>2</sub>NG). Широке практичне впровадження водневих технологій потребує суттєвих новацій, які мають бути підтримані введенням нових стандартів, зокрема це стосується засобів для взаємодії електролізерів та електричної мережі (постачання електроенергії від відновлюваних джерел енергії та електростанцій до електролізерів та використання електролізерів для стабілізації роботи електричної мережі) та змін щодо використання електролізерів для перетворення електроенергії, отриманої з мережі, у водень; змін в інфраструктурі та складових системи постачання природного газу для транспортування отриманого в електролізерах водню та зберігання суміші водню й природного газу; створення водневої системи (інфраструктури, складових, засобів зберігання) та щодо кінцевих споживачів чистого водню, включаючи промислових кінцевих споживачів, великі підземні сховища у соляних печерах, стаціонарні системи зберігання невеликих масштабів, заправки воднем, а також таких засобів транспортування, як паливозаправники з цистернами та блоки балонів. Особлива увага при-

діляється питанням безпеки, навчання персоналу, метрології, моніторингу, випробуванням, сертифікації, а також регулюванню й законодавству.

Для виконання цих завдань створено спільний технічний комітет стандартизації CEN/CLC/JTC 6 «Водень в енергетичних системах», та, з огляду на складність і комплексність проблем, до роботи залучено також інші комітети: європейські CEN/TC 234 «Газова інфраструктура» і CEN/TC 268 «Кріогенні посудини та особливі застосування водневих технологій» та міжнародні ISO/TC 197 «Водневі технології», IEC/TC 105 «Технології паливних елементів». Крім того, розробниками стандартів, до сфери застосування яких потрапляють водень та водневі технології, є також технічні комітети: європейські CEN/TC 408 щодо біометану та скрапленого природного газу, CEN/TC 238 щодо випробувальних газів, CEN/TC 58 щодо приладів безпеки та контролю пальників та приладів і міжнародні ISO/TC 193 щодо природного газу, ISO/TC 158 щодо аналізування газів, ISO/TC 58 щодо газових балонів, ISO/TC 22 щодо дорожніх транспортних засобів, ISO/TC 192 щодо газових турбін, ISO/PC 252 щодо станцій заправки газом [30]. Створено також спільний технічний комітет стандартизації CEN/CLC/JTC 17 щодо газових приладів на паливних елементах з комбінованим виробництвом тепла та електроенергії (Fuel Cell Gas Appliances with Combined Heat and Power), який розробив стандарт EN 50465 [29].

На сьогодні в рамках виконання проекту FCH JU розроблено дорожні карти щодо стандартизації за кожним з наведених вище напрямків, згідно з якими нові стандарти мають бути створені до 2025 р.

Для розвитку українських та практичного впровадження існуючих закордонних енергоефективних та екологічно чистих водневих технологій необхідно розроблення в Україні відповідних національних стандартів, зокрема гармонізованих з міжнародними.

В Україні вже розпочато впровадження нових стандартів для створення водневої енергетики. Так, в рамках виконання програми «Сприяння взаємній торгівлі шляхом усунення технічних бар'єрів у торгівлі між Україною та Європейським Союзом» технічним комітетом стандартизації України ТК 48 «Енергозбереження» розроблені та вже набули чинності національні стандарти (які гармонізовані з міжнародними стандартами), стосовно вимог щодо: безпечності (ДСТУ EN 62282-3-100:2014), установлення (ДСТУ EN 62282-3-300:2017) стаціонарних енергетичних установок на паливних елементах та безпечності переносних енергетичних установок на паливних елементах (ДСТУ EN 62282-5-1:2017), але два з них вже потребують оновлення, оскільки вийшли нові версії відповідних міжнародних стандартів [31–33].

Для розвитку водневої енергетики в Україні необхідно гармонізувати цілий комплекс відповідних міжнародних та європейських стандартів, які вже чинні та ще розробляються.

## ВИСНОВКИ

1. Розроблення та впровадження нових систем водневої енергетики, які можна використати зі застосуванням наявних в Україні енергетичних ресурсів, інтегрувати в існуючі системи чи створити нові системи вироблення, транспортування та розподілення енергії є важливими факторами для національної безпеки України в умовах можливої небезпеки зниження наповнення існуючої газотранспортної та нафтотранспортної систем постачання енергоносіїв.

2. У світі спостерігається значне збільшення впровадження енергетичних установок на паливних елементах в різних областях промисловості як в масштабі малих електричних потужностей (від 1 до 250 кВт), так і великих потужностей (від 1 до 60 МВт). Це пояснюється підвищеною енергоефективністю, екологічною чистотою, компактністю, мобільністю та надійністю енергоустановок на паливних елементах навіть в умовах автономного децентралізованого постачання електричної і теплової енергії. У 2019 р. річний світовий об'єм реалізації енергетичних установок на паливних елементах перевищив 1 ГВт.

3. Впровадження технологій енергоустановок на паливних елементах в промислово розвинутих країнах розглядається як основа для створення централізованої світової водневої економіки з наявністю та подальшим розвитком розгалуженої водневої інфраструктури.

4. Для практичного впровадження енергоефективних та екологічно чистих водневих технологій в Україні, зокрема виробництва чи імпортування обладнання з подальшою його сертифікацією, необхідна відповідна база нормативних документів, які повинні не тільки охоплювати весь життєвий цикл ЕУПЕ та стосуватись допоміжного обладнання, а й сприяти розвитку інфраструктури водневої енергетики. Для створення зазначеної бази необхідно розробити комплекс національних стандартів, які мають бути гармонізованими з європейськими та міжнародними з метою усунення можливих технічних бар'єрів у торгівлі.

1. Dudnyk O.M., Sokolovska I.S. Modern Fuel Cell Power Systems. Coal and solid organic waste gasification for hydrogen-rich synthesis gas production. *Improving the efficiency and environmental performance of the combustion, gasification and thermochemical conversion of solid fuels: Abstracts of the Reports of the First Ukrainian-Polish Workshop, 28 February - 1 March, 2017*. Kyiv, 2017. P. 46—48.

2. Дудник О.М., Дунаєвська Н.І., Соколовська І.С. Застосування технологій парогазових енергетичних установок з внутрішньоцикловою газифікацією твердого та рідинного видів палива у світовій енергетиці та перспективи їх впровадження в Україні. *Проблеми загальної енергетики*. 2019. Вип. 3(58). С. 37—44. <https://doi.org/10.15407/pge2019.03.037>
3. Ross K. Fuel cell market breaks 1 GW global capacity barrier. *Power Engineering International*. 2020. №1. 1 p. URL: <https://www.powerengineeringint.com/2020/01/10/fuel-cell-market-breaks-1-gw-global-capacity-barrier/> (дата звернення: 10.01.2020).
4. Шульженко С.В., Денисов В.А. Конкурентоспроможність паливних елементів відносно традиційних технологій виробництва електричної та теплової енергії. *Проблеми загальної енергетики*. 2014. Вип. 3(38). С. 29—35.
5. Hart D., Lehner F., Jones S., Lewis J., Klippenstein M. The Fuel Cell Industry Review. *4th Energy Wave*. 2018. 50 p. URL: <http://www.fuelcellindustryreview.com/archive/TheFuelCellIndustryReview2018.pdf> (дата звернення: 25.11.2019).
6. Корчевой Ю.П., Дудник А.Н., Зварич В.Н. Энергетические установки с топливными элементами как привод автомобилей и автобусов (Обзор). *Экотехнологии и ресурсосбережение*. 2002. № 1. С. 9—21. URL: [https://scholar.google.com/scholar?hl=ru&as\\_sdt=0,5&cluster=6107689998092583445](https://scholar.google.com/scholar?hl=ru&as_sdt=0,5&cluster=6107689998092583445) (дата звернення: 27.11.2019).
7. US Car Sales Data. Toyota. Toyota Mirai. URL: <http://carsalesbase.com/us-car-sales-data/toyota/toyota-mirai/> (дата звернення: 27.11.2019).
8. Toyota Mirai. URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Toyota\\_Mirai](https://uk.wikipedia.org/wiki/Toyota_Mirai) (дата звернення: 28.11.2019).
9. Hydrogen Stations Map. URL: <https://www.h2stations.org/stations-map/?lat=49.139384&lng=11.190114&zoom=2%20> (дата звернення: 12.12.2019).
10. Дудник А.Н., Корчевой Ю.П., Майстренко А.Ю. Гибридные энергетические установки на топливных элементах. *Энергетика: Экономика, технология, экология*. 2000. № 3. С. 33—36.
11. Dudnyk O.M., Sokolovska I.S. Conversion of Ukrainian Low Grade Solid Fuels with CO<sub>2</sub> Capture. *Proceedings of 27th Annual International Pittsburgh Coal Conference, 2010*. PPC 2010. Volume 2. Pages 1012-1033. URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84877597445&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&sid=c0a5801ca6bef4f2b04932f0a455ce99&sot=autdocs&sdt=autdocs&sl=18&s=AU-ID%2855694353900%29&relpos=2&citeCnt=0&searchTerm> (дата звернення: 29.11.2019).
12. Dudnik O., Sokolovska I. (2005) Results of Organic Fuel Conversion at Fuel Cell Test Installation. In: Sammes N., Smirnova A., Vasylyev O. (eds) *Fuel Cell Technologies: State and Perspectives. NATO Science Series (Mathematics, Physics and Chemistry)*, vol 202. Springer, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/1-4020-3498-9\\_15](https://doi.org/10.1007/1-4020-3498-9_15) URL: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/1-4020-3498-9\\_15](https://link.springer.com/chapter/10.1007/1-4020-3498-9_15) (дата звернення: 29.11.2019).
13. Ando O., Oozawa H., Mihara M., Irie H., Urashita Y., Irthami T. Demonstration of SOFC-Micro Gas Turbine (MGT) Hybrid Systems for Commercialization.

- Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*. 2015. Vol. 52. No. 4. P. 43—52. URL: <https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/e524/e524047.pdf> (дата звернення: 02.12.2019).
14. Irie H., Miyamoto K., Teramoto Y., Nagai T., Endo R., Urashita Y. Efforts toward Introduction of SOFC-MGT Hybrid System to the Market. *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*. 2017. Vol. 54. No. 3. P. 69—72. URL: <http://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/e554/e554170.pdf> (дата звернення: 11.12.2019).
  15. Berg H.P., Kleissl M., Himmelberg A., Lehmann M., Prechavut N., Vorpahl M. Heat balancing of direct reforming fuel cells in MGT-SOFC hybrid systems IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 501 012007. 2019. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/501/1/012007>
  16. The role of hydrogen and fuel cells in providing affordable, secure low-carbon heat. White paper. A H2FC Supergen. The hydrogen and fuel cell research hub. Ed. Paul Dodds and Adam Hawkes. London: Imperial College. 2014. 186 p. URL: <http://www.h2fcsupergen.com/wp-content/uploads/2014/05/H2FC-SUPERGEN-White-Paper-on-Heat-May-2014.pdf> (дата звернення: 09.12.2019).
  17. Дудник А.Н., Мелак В.Г. Водородные автозаправочные станции. *Экотехнологии и ресурсосбережение*. 2007. № 4. С. 3—12. URL: [http://udf-cat.tntu.edu.ua/client/page\\_lib.php?docid=42712&mode=DocBibRecord](http://udf-cat.tntu.edu.ua/client/page_lib.php?docid=42712&mode=DocBibRecord) (дата звернення: 02.12.2019)
  18. Дудник О.М., Соколовська І.С. Дослідження процесів отримання водню з українських енергетичних кам'яних та бурих видів вугілля. *Водень в альтернативній енергетиці та новітніх технологіях* / [за заг. ред. академіків НАНУ В.В. Скорохода та Ю.М. Солоніна]. К.: «КІМ», 2015. С. 91—97. URL: <http://www.materials.kiev.ua/Hydrogen/mono2.pdf> (дата звернення: 18.12.2019).
  19. Дудник О.М., Трипольський А.І., Стрижак П.Е., Калишин Є.Ю., Соколовська І.С. Отримання водню гетерогенно-каталітичною конверсією твердих органічних відходів. *Водень в альтернативній енергетиці та новітніх технологіях* [ за заг. ред. академіків НАНУ В.В. Скорохода та Ю.М. Солоніна]. К.: «КІМ», 2015. С. 24—32. URL: <http://www.materials.kiev.ua/Hydrogen/mono2.pdf> (дата звернення: 17.12.2019).
  20. Дудник А.Н., Стрижак П.Е., Соколовская И.С., Трипольский А.И., Калишин Е.Ю., Донец В.В. Изучение процесса карбонизации шелухи подсолнечника. *Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии*. Днепропетровск: НПВК «Триако». 2011. Вып. 3(8). С. 74—78. URL: [http://modern.science.triacon.org/ru/issues/2011/files/2011\\_3\(8\)\\_15.htm](http://modern.science.triacon.org/ru/issues/2011/files/2011_3(8)_15.htm) (дата звернення: 18.12.2019).
  21. Manufacturing Cost Analysis of 1, 5, 10, and 25 kW Fuel Cell Systems for Primary Power and Combined Heat and Power Applications. Battelle Memorial Institute. 2017. 293 p. URL: [https://www.energy.gov/sites/prod/files/2018/02/f49/fcto\\_battelle\\_mfg\\_cost\\_analysis\\_1%20to\\_25kw\\_pp\\_chp\\_fc\\_systems\\_jan2017\\_0.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2018/02/f49/fcto_battelle_mfg_cost_analysis_1%20to_25kw_pp_chp_fc_systems_jan2017_0.pdf) (дата звернення: 16.12.2019).
  22. Maruta A. Japan's ENE-FARM programme. Open Workshop "Fuel cells: Why is Austria not taking off?". 2016. 22 p. URL: <https://www.energyagency.at/fileadmin/dam/pdf/projekte/gebaeude/Maruta.pdf> (дата звернення: 02.01.2020).
  23. Kim E. Feature: South Korea flies flag for fuel cells. *Power Engineering International*. 2018. Vol. 26, Issue 8. 5 p. URL: <https://www.powerengineeringint.com/2018/08/15/feature-south-korea-flies-flag-for-fuel-cells/> (дата звернення: 16.12.2019).
  24. HiEff-BioPower. Development of a new highly efficient and fuel flexible CHP technology based on fixed-bed updraft biomass gasification and a SOFC. URL: <https://ec.europa.eu/inea/en/horizon-2020/projects/h2020-energy/combined-heat-and-power/hieff-biopower> (дата звернення: 19.12.2019).
  25. Український класифікатор нормативних документів ДК 004:2008 (ICS:2005, MOD). URL: <http://uas.org.ua/ua/services/standartizatsiya/dk-004-2008-ukrayinskiy-klasifikator-normativnih-dokumentiv/> (дата звернення: 03.01.2020).
  26. Офіційний сайт ISO. URL: <https://www.iso.org/> (дата звернення: 08.01.2020).
  27. Офіційний сайт IEC. URL: <https://www.iec.ch/> (дата звернення: 09.01.2020).
  28. Офіційний сайт CENELEC. URL: <https://www.cenelec.eu/> (дата звернення: 09.01.2020).
  29. Офіційний сайт CEN. URL: <https://standards.cen.eu/> (дата звернення: 08.01.2020).
  30. Sector Forum Energy Management / Working Group Hydrogen Final Report; EUR 27641 EN; 10.2790/66386. URL: [https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC99525/sfem%20wg%20hydrogen\\_final%20report%20\(online\).pdf](https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC99525/sfem%20wg%20hydrogen_final%20report%20(online).pdf) (дата звернення: 03.01.2020).
  31. ДСТУ EN 62282-3-100:2014 Технології паливних елементів. Частина 3-100. Стаціонарні енергетичні установки на паливних елементах. Вимоги щодо безпеки (EN 62282-3-100:2012, IDT) / Кулик М., Дубовський С., Дудник О., Соколовська І., Стоянова І., Каденський М., Хортова О., Шварцман З. [Чинний від 2019-01-01]. (Національний стандарт України).
  32. ДСТУ EN 62282-3-300:2017 (EN 62282-3-300:2012, IDT; IEC 62282-3-300:2012, IDT) Технології паливних елементів. Частина 3-300. Стаціонарні енергетичні установки на паливних елементах. Установлення / Соколовська І.С., Білодід В.Д., Дудник О.М., Куц Г.О., Коберник В.С., Шляпін В.О. [Чинний від 2019-01-01]. (Національний стандарт України).
  33. ДСТУ EN 62282-5-1:2017 (EN 62282-5-1:2012, IDT; IEC 62282-5-1:2012, IDT) Технології паливних елементів. Частина 5-1. Переносні енергетичні установки на паливних елементах. Вимоги щодо безпеки / Соколовська І.С., Білодід В.Д., Дудник О.М., Куц Г.О., Коберник В.С., Шляпін В.О. [Чинний від 2019-01-01]. (Національний стандарт України).

Надійшла до редколегії: 14.01.2020