



Наказом МОН України від 10.10.2022 р. №894 видання включено до **категорії «Б»** за спеціальностями: 051 – економіка; 072 – фінанси, банківська справа, страхування та фондовий ринок; 073 – менеджмент; 076 – підприємництво, торгівля та біржова діяльність; 292 – міжнародні економічні відносини

DOI 10.56197/2786-5827/2025-4-1-2

УДК 621.35

Олефір Володимир Костянтинович,
кандидат економічних наук, старший науковий співробітник,
провідний науковий співробітник відділу секторальних прогнозів та кон'юнктури ринків,
Державна установа “Інститут економіки та прогнозування
Національної академії наук України”,
вул. Панаса Мирного, 26, м. Київ, 01011, Україна,
email: oksavol@ukr.net
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4180-3435>
Scopus ID: 56529406600

Olefir Volodymyr,
PhD in Economics, Senior Researcher,
Leading Research Fellow, Department of Sectoral Forecasts and Market Conditions,
State Organization “Institute for Economics and Forecasting, NAS of Ukraine”
Panasa Myrnoho str., 26, Kyiv, Ukraine, 01011
email: oksavol@ukr.net
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4180-3435>
Scopus ID: 56529406600

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ЛІТІУ В СИСТЕМАХ ЗБЕРІГАННЯ ЕНЕРГІЇ

PROSPECTS OF THE USE OF LITHIUM IN ENERGY STORAGE SYSTEMS

Вступ. Україна має великі запаси літєвих руд, що дає можливість залучити вітчизняні підприємства та установи, які мають відношення до електрохімічної сфери, до світової кооперації у створенні систем зберігання енергії. В цьому контексті метою статті було дослідити перспективи застосування літію в сучасних системах зберігання енергії, а також оцінити вітчизняний науковий потенціал створення систем зберігання енергії для відновлюваної енергетики.

Матеріали та методи. Для проведення дослідження використовувались такі методи: аналізу і синтезу, порівняння, монографічний, економіко-статистичний, системного підходу тощо. Для оцінки перспектив літію в сучасних системах зберігання енергії і потенціалу вітчизняної науки було зроблено огляд наукових публікацій за темою дослідження.

Результати і обговорення. Порівняння найбільш відомих на сьогодні систем зберігання енергії дозволяє зробити висновок, що найбільш дешевими, гнучкими, компактними, екологічними та ефективними є електрохімічні системи зберігання енергії. Інші системи зберігання енергії займають свої ніші, технологічно розвиваються і будуть складати

конкуренцію для електрохімічних систем. В електрохімічних системах зберігання енергії ключову роль відіграє літій як найбільш енергоємний метал. Літій складає основу літій-іонних акумуляторів, а також входить до складу інших інноваційних акумуляторів, які з часом можуть замінити літій-іонні батареї. Таким чином, у середньостроковій перспективі попит на літій найбільш імовірно буде стабільним, що відкриває перспективи для вітчизняної літійової галузі.

Висновки. В електрохімічних системах зберігання енергії ключову роль відіграє літій, завдяки своїй високій енергоємності. Зараз попит на літій формують літій-іонні батареї, які мають велику питому вагу в електрохімічних системах зберігання енергії. Але і в перспективі, коли життєвий цикл літій-іонних батарей буде закінчуватись, попит на літій буде зберігатись завдяки його високим технічним характеристикам.

Україна має достатній науковий потенціал для розвитку електрохімічної галузі. Про свідчить як історія формування наукової школи електрохімії в інститутах НАН України, так і сучасні дослідження, які проводять українські вчені в західних університетах і в Україні.

Ключові слова: літій, системи зберігання енергії, оцінка попиту, науковий потенціал, відновлювана енергетика, літій-іонні батареї

Introduction. Ukraine has large reserves of lithium ores, which makes it possible to attract domestic enterprises and institutions related to the electrochemical field to global cooperation in the creation of energy storage systems. In this context, the purpose of the article was to investigate the prospects for the use of lithium in modern energy storage systems, as well as to assess the domestic scientific potential of creating energy storage systems for renewable energy.

Materials and methods. The following methods were used to conduct the research: analysis and synthesis, comparison, monographic, economic-statistical, systemic approach, etc. To assess the prospects of lithium in modern energy storage systems and the potential of domestic science, a review of scientific publications on the topic of the study was made.

Results and discussion. A comparison of the best-known energy storage systems today allows us to conclude that electrochemical energy storage systems are the cheapest, most flexible, compact, ecological and efficient. Other energy storage systems occupy their niches, develop technologically and will compete for electrochemical systems. Lithium, as the most energy-intensive metal, plays a key role in electrochemical energy storage systems. Lithium forms the basis of lithium-ion batteries, and is also part of other innovative batteries that may eventually replace lithium-ion batteries. Thus, in the medium term, the demand for lithium is most likely to be stable, which opens up prospects for the domestic lithium industry.

Conclusions. Lithium plays a key role in electrochemical energy storage systems due to its high energy density. Currently, the demand for lithium is formed by lithium-ion batteries, which have a large specific weight in electrochemical energy storage systems. But in the future, when the life cycle of lithium-ion batteries will end, the demand for lithium will remain due to its high technical characteristics.

Ukraine has sufficient scientific potential for the development of the electrochemical industry. This is evidenced both by the history of the formation of the scientific school of electrochemistry in the institutes of the National Academy of Sciences of Ukraine, and by modern research conducted by Ukrainian scientists in Western universities and in Ukraine.

Keywords: lithium, energy storage systems, demand assessment, scientific potential, renewable energy, lithium-ion batteries

JEL Classification: O39, Q29, Q42

Вступ. Розвиток відновлюваної енергетики з кожним роком стає все більш актуальним завданням. У 2024 р. температура на всіх континентах у літні місяці була на 1,5°C

вищою за температуру у доіндустріальний період¹. При цьому було перевершено температурний рівень 2023 р., який також був рекордним. За оцінками вчених у 2024 р. температура на усіх континентах була найвищою після останнього четвертинного зледеніння на планеті.

Зміна клімату, яке є безпосереднім наслідком глобального потепління, несе в собі великі загрози і виклики. Особливо якщо зростання середньостатистичної температури буде відбуватись у прискореному темпі. Зміна клімату порушує стабільність сільськогосподарського виробництва і підвищує імовірність неврожаїв. Зокрема, у 2024 р. в Україні вегетаційний період сільськогосподарських культур почався на 2 тижні раніше ніж зазвичай, у травні мали місце сильні заморозки, а влітку – аномальна спека і практично повна відсутність опадів. У підсумку за попередніми оцінками було отримано зменшення врожаю (у порівнянні з 2023 р.): зернових і олійних культур – на 12%, картоплі – на 18%, яблук – на 40%. Рання весна, заморозки у травні, аномальна спека і посуха влітку були прямо пов'язані із зміною клімату.

Аномальна спека негативно впливає на організм людини, спричиняючи сонячні удари та опіки, теплові судоми і виснаження, загострення хронічних хвороб тощо. Температура повітря для нормального функціонування організму не повинна перевищувати 37°C. При цьому у 2023 р. було зафіксовано такі екстремальні показники температури повітря: Марокко, Алжир – 40°C; Бангладеш – 41°C; Таїланд, Ізраїль – 45°C; Мексика – 50°C; Пуерто-Ріко – 52°C. Під впливом кліматичних змін середня температура повітря зростає в усіх країнах, але місцевості, де вона перевищує 40°C, стають практично непридатними для постійного проживання. Кліматичні зміни і глобальне потепління спричиняють такі негативні явища: лісові пожежі, підвищення рівня Світового океану, аномальні опади, катастрофічні повені, руйнівні буревії, трансформацію рослинного і тваринного світу тощо.

Основною причиною глобального потепління і кліматичних змін є викиди парникових газів: діоксиду вуглецю (CO₂), метану (CH₄), оксиду азоту (N₂O), гідрофторвуглецевих сполук, перфторвуглецевих сполук, гексафториду сірки (SF₆) тощо. Серед парникових газів найбільший вплив на глобальне потепління справляє діоксид вуглецю, основними продуцентами якого є виробники електричної і теплової енергії. На сьогодні енергетичний сектор створює 46% глобального збільшення викидів парникових газів, спалюючи вугілля, нафтопродукти і природний газ².

Екологічною альтернативою викопному паливу є відновлювані джерела енергії: енергія Сонця, вітру, води (річок, приливів, відливів), геотермальних підземних вод, біомаси. Ці джерела енергії мають великий потенціал для зменшення викидів вуглекислого газу, оскільки вони практично не виробляють діоксиду вуглецю та інших забруднюючих речовин. “Зелений” перехід енергетики від викопного палива до відновлювальних джерел енергії буде найбільш важливою трансформацією у наступні десятиліття. В цьому контексті акценти переносяться з викопного палива на екологічні мінеральні ресурси, до яких можна віднести і літій. Україна має запаси літєвих руд, а відповідно і потенціал залучення до світових процесів “зеленої” трансформації.

Матеріали та методи. Для перетворення відновлюваної енергії в електричну і теплову розроблено достатньо багато технологій та спеціального обладнання. Сонячна енергія перетворюється в електричну за допомогою фотоелектричних елементів, в теплову - із використанням сонячних колекторів. Кінетична енергія вітру трансформується в електричну за допомогою вітрогенераторів, а кінетична енергія води – із використанням гідротурбін. Теплова енергія підземних вод у вигляді пару чи гарячої води через свердловини надходить у системи теплопостачання або до парових турбін з електрогенераторами.

¹ URL: <https://www.washingtonpost.com/climate-environment/2024/09/05/hottest-summer-record-heatwave-global-temperature/> (дата звернення: 25.12.2024)

² URL: <https://dodo.eco/blog/a-breakdown-of-the-industries-producing-the-most-carbon-across-the-world> (дата звернення: 25.12.2024)

Відновлювана енергетика має багато переваг перед традиційною, але має також і ряд недоліків (Alam, 2020). Зокрема, більш складною стає проблема керування електричними системами, які інтегруються з відновлюваними джерелами. Суттєвими стають такі технічні проблеми як: підвищена невизначеність, високий струм замикання, низький запас генерації тощо. Промислові сонячні електростанції потребують відведення великих земельних площ, для роботи гідроелектростанцій необхідні греблі і штучні водоймища, які затоплюють великі території. Проблема дефіциту площ для сонячних електростанцій частково вирішує їх подвійне використання для виробництва електроенергії та сільськогосподарської продукції (агровольтаїка). Однак ця інновація потребує технологічної адаптації, вирішення соціальних і регуляторних питань тощо (Soto-Gómez, 2024).

Найбільшим недоліком відновлюваних джерел енергії є нестабільність генерації електричної енергії, яка залежить від часу доби, пори року і багатьох випадкових чинників. Негативним наслідком нестабільності є як відсутність генерації, так і надмірне постачання електроенергії до мережі. Короткочасне надмірне виробництво може негативно вплинути на характеристики напруги і потік електроенергії. Для подолання цього недоліку використовуються системи зберігання енергії, які зменшують вихідну потужність, регулюють частоту і забезпечують надійність напруги.

Метою статті було оцінити перспективи використання літію в системах зберігання енергії в контексті останніх досягнень науково-технічного прогресу, а також оцінити вітчизняний науковий потенціал щодо більш широкого залучення до “зеленого” переходу енергетики на відновлювані джерела енергії.

Під час проведення дослідження були використані такі методи: монографічний, аналізу і синтезу, порівняння, економіко-статистичний, системного підходу тощо.

Результати і обговорення. На сьогодні існують різноманітні технології зберігання енергії для стабілізації електромереж: 1) насосна гідроакумуляція (pumped hydroelectric storage) (Blakers, 2021); 2) накопичення енергії в стисненому повітрі (compressed air energy storage) (Rabi, 2023); 3) електрохімічне зберігання в батареях (battery energy storage system) (Hannan, 2021); 4) зберігання енергії у водні та аміаку (Palys, 2020); 5) використання маховиків (flywheel energy storage) (Xu, 2023) і суперконденсаторів (supercapacitor) (Czaganu, 2024); 6) термічне і гравітаційне зберігання (Tong, 2022) тощо.

У 2023 р. у світі найбільше енергії зберігалось із використанням технології насосної гідроакумуляції, яка є одним із варіантів використання енергії земного тяжіння. Суть технології полягає у тому, що тимчасовий надлишок електроенергії використовується для підйому води у водойму, яка розташована відносно високо до рівня Світового океану. Коли в мережі з'являється дефіцит електроенергії, то вода з водойми подається на гідротурбіни. Таким чином відбувається накопичення енергії та її використання.

На сьогодні загальна потужність зберігання усіх гідроакумуляючих електростанцій становить 181 ГВт³. В експлуатації знаходиться 86 гідроакумуляючих електростанцій потужністю більше 1 ГВт, які розташовані в КНР, Японії, США, Австралії, ЄС, Великій Британії, на Тайвані, в Швейцарії, Індії, Південній Африці, Республіці Корея. В Україні працює Дністровська ГАЕС, будівництво якої було розпочато у 1983 р. і триває до цього часу одночасно з експлуатацією готових гідроагрегатів.

Найбільші потужності зберігання гідроакумуляючих електростанцій мають: КНР – 32,0 ГВт, Японія – 28,3 ГВт, США – 22,6 ГВт. Слід відзначити велике поширення гідроакумуляючих електростанцій в Китаї. Ця країна має 39 діючих ГАЕС і 110(!) ГАЕС потужністю більш як 1 ГВт, які перебувають у стадії будівництва. Для порівняння в Японії на сьогодні будується тільки одна нова ГАЕС, а в США не будується жодної.

Технологія стиснення повітря має значний потенціал для зберігання енергії (Borri, 2022). Тимчасовим надлишком енергії повітря стискається і зберігається у великих підземних

³ URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-installed-energy-storage-capacity-by-scenario-2023-and-2030> (дата звернення: 25.12.2024)

сховищах (печерах). Коли виникає потреба в додатковій енергії повітря випускається із сховища і обертає турбіну. У 2023 р. в Китаї працювали 3 установки накопичення енергії шляхом стиснення повітря. Існує також технологія накопичення енергії шляхом стискання і охолодження повітря і перетворення його на рідину (liquid air). При цьому, для переходу в рідкий стан повітря охолоджується до -196°C . Станом на 2023 р. ця технологія перебувала на стадії підготовки до комерційного використання.

Великі перспективи має накопичення енергії із використанням водню та аміаку (Sadeq, 2024). “Зелений” водень отримують в результаті електролізу води, а в кінетичну енергію він перетворюється під час спалення в двигунах внутрішнього згорання. Очікується, що водень стане найбільш поширеним енергоносієм для сезонного зберігання. Теоретично для зберігання водню можна використовувати наявну інфраструктуру зберігання природного газу, але для цього необхідна наявність відповідних будівельних матеріалів, тиску в сховищах тощо.

Реакцією з азотом водень можна перетворити на аміак (процес Габера-Боша). Зберігання аміаку є більш дешевим, ніж зберігання водню. При цьому аміак так само, як і водень можна спалювати в двигунах внутрішнього згорання і трансформувати в інші види енергії (Aziz, 2020).

Маховики (flywheel) накопичують енергію у механічній формі (Li, 2022). Вони мають тривалий термін служби і не залежать від температури навколишнього середовища. Ця технологія доведена до комерційного використання, але є більш коштовною, ніж інші види зберігання енергії і тому на сьогодні застосовується фрагментарно.

Так само у відносно незначних обсягах зараз використовуються технології термічного і гравітаційного зберігання енергії (за виключенням гідроаккумуляції). Прикладом термічного зберігання є акумулятор Карно (Carnot battery), який перетворює електричну енергію в теплову, зберігає її у такому стані, а потім трансформує знову в електричну (Novotny, 2022). Гравітаційна технологія накопичує енергію шляхом переміщення вгору важких предметів (Hunt, 2023). Для цього використовується інфраструктура непрацюючих шахт або спеціально побудованих веж. Під час контрольованого спуску вантажів відбувається обертання турбін і перетворення кінетичної енергії в електричну.

Системи зберігання енергії повинні бути рентабельними, коли витрати на зберігання і трансформацію енергії окупаються вартістю отриманої електроенергії. На сьогодні існує багато технологій зберігання енергії на стадії комерційного використання або на стадіях доведення до комерційного використання. Вони вдосконалюються, і з часом окремі з цих технологій, як наприклад водневі, можуть вийти на провідні позиції. Але в середньостроковій перспективі найбільш поширеними будуть технології зберігання енергії із використанням електрохімічних процесів.

Станом на 2023 р. найбільшими накопичувачами енергії в світі фактично були гідроакмулюючі електростанції, потужність зберігання яких становила 181 ГВт. На другому місці були системи зберігання енергії великих промислових виробників електроенергії (utility-scale batteries) – 55 ГВт. На третьому місці перебували системи зберігання енергії автономних промислових і побутових виробників (behind-the-meter batteries) – 33 ГВт. Промислові і побутові виробники створювали і зберігали електроенергію для власних потреб, а надлишки передавали в мережу. Як промислові виробники, так і автономні використовували електрохімічні системи зберігання енергії.

Хоча гідроакмулюючі електростанції на сьогодні мають найбільші потужності зберігання енергії, мало імовірно, що вони стануть основними суб'єктами зберігання енергії для відновлюваної енергетики, яка швидко зростає. ГАЕС мають велику вартість будівництва, особливі умови щодо розміщення резервуарів, спричиняють негативні наслідки для довкілля і найближчих населених пунктів від великої концентрації води.

Крім того, в умовах глобального потепління використання відкритих водойм для зберігання енергії втрачає свою ефективність внаслідок великих обсягів випаровування води. На сьогодні гідроаккумуляцію розвиває практично тільки одна країна, яка має для цього

унікальні передумови. Інші провідні інноваційні країни основну увагу приділяють електрохімічним системам зберігання енергії, які більш дешеві, гнучкі, компактні та екологічні.

Електрохімічні акумуляторні системи накопичення енергії (battery energy storage system (BESS)) мають найбільшу швидкість реакції на коливання в мережі серед усіх систем зберігання енергії. Вони можуть менш ніж за секунду перейти від режиму очікування до роботи на повну потужність і працювати в такому режимі декілька годин. Акумуляторні станції не потребують доставки палива, вони компактні і працюють без систем охолодження і димових труб. На відміну від гідроакумуляуючих електростанцій BESS можна розгорнути в мережу, яка відносно швидко створюється. Станом на 2019 р. світова потужність BESS становила 365 ГВт-год. і швидко зростала⁴.

Серед електрохімічних акумуляторів (батареї) найбільші перспективи використання в системах відновлюваної енергетики мають літій-іонні батареї (ЛІБ)⁵. Застосування літію в хімічних джерелах струму створило революційний прорив в технології електричних акумуляторів. До цього для перетворення хімічної енергії в електричну використовувались такі метали як свинець, нікель, кадмій, срібло, цинк, а також водні електроліти.

З точки зору технічних характеристик (здатність зберігати заряд, термін роботи між перезарядками, вага, розміри, екологічність тощо) використання цих хімічних елементів досягло своєї межі. Особливо яскраво про це свідчить такий показник як енергоємність. Теоретичні значення питомої енергії, що можуть забезпечити метали складають (Вт-год / кг): кадмій – 190, нікель – 278, цинк – 623. В той час як літій має питому енергію в 11757 Вт-год / кг.

На теоретичному рівні можливість застосування літію в хімічних джерелах струму першим довів британо-американський хімік, професор Бінгемтонського університету (США) Майкл Вітінгем (1941 р. н.). Крім Бінгемтонського університету цей вчений працював також у Стенфордському університеті, у дослідницьких центрах корпорації ExxonMobil (США) і компанії Schlumberger (Шлюмберже) (США). У 1977 р. Майкл Вітінгем запатентував дисульфід титану (TiS₂) як катод для літійових джерел струму. За внесок у створення ЛІБ він отримав у 2019 р. Нобелівську премію з хімії.

Розробками та ідеями Майкла Вітінгема швидко зацікавились інші відомі вчені. Зокрема, це стосується американського матеріалознавця, спеціаліста у сфері фізики твердого тіла, професора Техаського університету в Остіні Джона Гуденафа (1922-1923). Впродовж своєї наукової кар'єри він працював у Массачусетському технологічному інституті, а також в Оксфордському університеті. У 1980 р. Джон Гуденаф запатентував кобальтит літію як катодний матеріал для літій-іонних джерел струму. Цей матеріал було комерціалізовано фірмами Sony, Asahi Kasei Corporation і Toshiba Corporation.

У 1996 р. Джон Гуденаф запропонував літій-залізо-фосфат як катодний матеріал для літій-іонних джерел струму. Цей матеріал було комерціалізовано американськими і тайванськими фірмами, зокрема для електромобілів. Зараз літій-залізо-фосфатні акумулятори (LiFePO₄) завдяки низькій ціні, високій безпечності, малій токсичності і тривалій службі знайшли широке використання в системах зберігання енергії. За внесок у створення ЛІБ Джон Гуденаф отримав у 2019 р. Нобелівську премію з хімії.

Найбільший внесок у комерціалізацію літій-іонних джерел струму зробив японський хімік, професор університету Мейджо (Meijo) в Нагої (Японія) Акіра Йосіна (1948 р. н.). Впродовж своєї наукової кар'єри цей фахівець працював переважно у дослідницьких центрах японських корпорацій Asahi Kasei Corporation і Toshiba Corporation. Починаючи з 1980-х років, Акіра Йосіна у своїх дослідженнях довів, що кобальтит літію є більш ефективним катодним матеріалом ніж дисульфід титану. Як анод він запропонував поліацетилен та інші вуглецеві

⁴ URL: <https://www.energy-storage.news/behind-the-numbers-the-rapidly-falling-lcoe-of-battery-storage/> (дата звернення: 25.12.2024)

⁵ URL: <https://www.nature.com/articles/s41467-020-19991-4> (дата звернення: 25.12.2024)

матеріали (графіт). Ще раніше французько-сінгапурський вчений марокканського походження, професор Наньянського технологічного університету (Сінгапур) Рашид Язамі (Rachid Yazami) запропонував використовувати графіт як анод⁶. Цей матеріал був більш ефективним, ніж металевий літій, який свого часу запропонував Майкл Вітінгем. Крім того Акіра Йосіна розробив алюмінієві колектори струму і засоби, які запобігають перезарядженню. За внесок у створення ЛІБ він отримав у 2019 р. Нобелівську премію з хімії.

Попит на літій-іонні джерела струму постійно зростає. Батареї є необхідним елементом портативної електроніки (мобільні телефони, смартфони, ноутбуки, цифрові камери, консолі для відеоігор тощо), електротранспорту (автомобілі, мотоцикли, велосипеди, самокати, інвалідні коляски, моноколеса, дрони), систем зберігання енергії, електроінструментів на акумуляторах (дрилі, пилки, шліф-машини, косарки тощо).

ЛІБ та інші батареї, які є основою систем відновлюваних джерел енергії, впродовж наступного десятиліття повинні зменшити, а потім повністю припинити викиди вуглецю. Поточні ЛІБ придатні для регулювання частоти, короткострокового зберігання, але проблеми з мінеральними ресурсами обмежують їх застосування. Сучасні ЛІБ працюють від місяців до років, а деякі – будуть працювати десятиліттями. Це значне досягнення з огляду на те, що багато матеріалів працюють за межами своїх термодинамічних порогів стабільності.

ЛІБ найбільше серед усіх батарей використовуються в системах зберігання енергії. За масштабами використання в системах зберігання енергії ЛІБ перебувають на другому місці після їх застосування в автомобілебудуванні. За прогнозом Clean Energy Associates (CEA) у 2030 р. 82% попиту на ЛІБ будуть формувати виробники електромобілів, 13% – виробники систем зберігання енергії, 4% – виробники мобільних телефонів та інших портативних електронних приладів⁷.

Швидкі темпи глобального потепління і незворотні кліматичні зміни стимулюють дослідження проблем відновлюваної енергетики. Тому, крім ЛІБ на сьогодні активно розробляються альтернативні види електрохімічних акумуляторів, які з часом можуть замінити літій-іонні. Окремі види цих акумуляторів використовують літій, а інші застосовують інші перспективні матеріали. Серед найбільш імовірних альтернатив слід відзначити: потокові батареї (flow batteries), натрій-іонні батареї, акумуляторні системи метал-повітря (M-Air), цинк-бромні акумулятори тощо.

В потокових батареях або окисно-відновлюваних проточних батареях (REDOX flow batteries від REDuction-OXidation) хімічна енергія забезпечується двома хімічними компонентами, розчиненими в рідинах, які прокачуються через систему з різних боків спеціальної мембрани. Принципова відмінність між звичайними і потоковими батареями полягає у тому, що в звичайних батареях енергія зберігається в електродах, а в потокових – в електроліті. Технічні переваги роблять потокові батареї перспективними для великомасштабного зберігання енергії (1 кВт-год. – 10 МВт-год.) з багатогодинними циклами заряду-розряду. Перевагою потокових батарей є тривалий термін експлуатації, а головним недоліком – низька потужність, що призводить до великої вартості. У 2022 р. найбільш комерційно успішними були ванадієві окисно-відновлювані батареї, які виробляли близько 40 компаній.

Натрій-іонні батареї є можливою альтернативою ЛІБ, оскільки вони виготовляються з більш дешевих і доступних матеріалів. Натрієві батареї більш підходять для стаціонарного використання, де розмір і вага не мають вирішального значення. Щоб натрій-іонні батареї довести до рівня промислового виробництва необхідні додаткові дослідження. Перевагами цих батарей є низька вартість, безпечність і довгий термін служби. В натрій-іонних батареях використовуються тверді електроліти, які мають багато переваг перед рідкими. Недоліками

⁶ У 2014 р. Рашид Язамі разом з Джоном Гуденафом і Акіро Йосіна за внесок у розробку літій-іонних джерел струму отримали премію Дрейпера Національної інженерної академії США (Draper Prize by The National Academy of Engineering)

⁷ URL: <https://www.energy-storage.news/europe-and-us-will-shave-c-10-off-chinas-li-ion-production-capacity-market-share-by-2030/> (дата звернення: 25.12.2024)

натрій-іонних батарей є: низка щільність енергії, менша кількість циклів перезарядження, підвищена чутливість до високих температур.

Акумуляторна система метал-повітря (M-Air) заснована на електрохімічних реакціях зарядження/розрядження, які відбуваються між позитивним “повітряним електродом” (катод) і негативним “металевим електродом” (анод). Негативний електрод виготовляють з літію, цинку, алюмінію, заліза, натрію, а позитивний електрод – з пористого вуглецевого матеріалу і каталізатору. Електроліт може бути водної або неводної природи (наприклад, система літій-повітря). Акумуляторні системи метал-повітря (M-Air) мають найвищий потенціал щільності енергії, що стимулює до проведення великої кількості досліджень по усьому світу.

Деякі первинні батареї метал-повітря вже комерціалізовані і продаються. Наприклад, цинкові батареї (цинк-повітря) використовуються в слухових апаратах. Подальший розвиток технології метал-повітря відбувається в таких напрямках: 1) поліпшення поточних характеристик систем Zn-Air і Li-Air; 2) вивчення та розробка нових систем метал-повітря: алюміній-повітря, залізо-повітря, ванадій-повітря, натрій-повітря тощо. Існує велика вірогідність, що впродовж наступних 10-15 років метало-повітряні батареї витиснуть ЛІБ (Rey, 2023).

Цинк-бромні акумулятори (ЦБА) використовують реакцію між металевим цинком і бромом для отримання електричного струму з електролітом. Електролітом є водний розчин бромиду цинку ($ZnBr_2$). Цинк давно використовується як негативний електрод первинних батарей, які не перезаряджаються. Він є широкодоступним і відносно недорогим металом. Основним використанням ЦБА є стаціонарне накопичення енергії як для мереж, так і для домашніх або автономних енергосистем. Водний електроліт робить ЦБА менш схильними до перегріву і займання ніж ЛІБ.

ЦБА мають також ряд інших переваг перед ЛІБ: 1) щоденна 100% глибина розряду; 2) невелике зниження ємності, що забезпечує більш як 5000 циклів; 3) відсутність системи охолодження; 4) недорогі і доступні матеріали для виробництва; 5) легка утилізація. Недоліками ЦБА є: 1) низька щільність енергії; 2) відносно низький ККД; 3) необхідність повної розрядки кожні кілька днів; 4) низька швидкість заряду і розряду. Ці особливості роблять ЦБА мало придатними для мобільного застосування, яке потребує швидкого зарядження і малої ваги. Основним напрямом перспективного використання ЦБА є стаціонарні системи зберігання енергії.

На сьогодні літій має гарні перспективи використання в системах відновлюваної енергетики, не дивлячись на сильну конкуренцію з боку інших матеріалів (Кушніренко, 2024). В першу чергу це стосується ЛІБ, які по багатьох характеристиках перевершують подібні електрохімічні акумулятори. Літій також застосовується в інших перспективних системах акумуляції, які з часом можуть перевершити ЛІБ за ефективністю (акумуляторні системи метал-повітря тощо).

Загалом завдяки своїм унікальним характеристикам літій ще довго буде займати провідне місце в системах зберігання енергії. Основним його недоліком є висока реакційна здатність і обмежені природні запаси, що робить його відносно дорогим. В цьому контексті важливе значення має циклічне, повторне використання літєвих ресурсів. Це дасть можливість відновлюваній енергетиці стабільно розвиватись і зменшити викиди діоксиду вуглецю до екологічно прийняттого рівня.

У ХХ столітті в Україні було створено наукову школу електрохіміків (Кириллов, 2019). Основні дослідження проводились в Інституті загальної і неорганічної хімії ім. В.І.Вернадського НАН України та Інституті фізичної хімії ім. Л.В.Писаржевського НАН України. Створені літєві джерела струму знайшли практичне використання в конструкціях спускового апарата космічної станції “Венера” і бурильної голівки Кольської надглибокої свердловини. В Україні було створено промислову базу виготовлення літій-іонних джерел струму. Зокрема, це стосується заводу “Генератор” ВО “Октава”, Луганського заводу лужних акумуляторів, Запорізького алюмінієвого комбінату.

Після здобуття незалежності і до цього часу наукові дослідження по тематиці літій-іонних джерел струму проводяться в Міжвідомчому відділенні електрохімічної енергетики НАН України (створення матеріалів і електролітів для літій-іонних джерел струму високої і надвисокої ємності), Інституті фізичної хімії ім. Л.В.Писаржевського НАН України (створення нанокомпозитних електродних матеріалів), Інституті загальної і неорганічної хімії ім. В.І.Вернадського НАН України (розробка твердоелектролітних провідних мембран), Інституті хімії високомолекулярних сполук НАН України (дослідження електролітів на основі іонних рідин), на кафедрі електрохімічної енергетики Київського національного університету технологій та дизайну (дослідження вуглецевих і кремнієвих анодних матеріалів, а також метало-повітряних батарей), Інституті біоорганічної хімії та нафтохімії ім. В.П. Кухаря НАН України (розробка електролітів з добавками нітрилу).

Багато українських вчених в галузі електрохімії працюють в закордонних дослідницьких центрах. Зокрема, випускник Київського національного університету ім. Тараса Шевченка Костянтин Турченко працює в Технологічному інституті Джорджії. Впродовж 2017-2023 рр. він разом з іншими дослідниками подав до Управління патентів і товарних знаків США 20 заявок на патенти, серед яких 8 заявок стосувались проблематики ЛІБ⁸. Серед його співавторів було п'ять українських науковців, які працюють як в Україні, так і в дослідницьких центрах США і Німеччини. Таким чином, вітчизняні електрохіміки певною мірою інтегровані до світового наукового простору. Зокрема, це стосується Інституту біоорганічної хімії та нафтохімії ім. В.П. Кухаря НАН України.

Зараз вітчизняні науковці, які досліджують проблематику літій-іонних джерел струму, не мають зв'язків з виробництвом, оскільки випуск в Україні ЛІБ та їх складових практично відсутній. Із здобуттям незалежності вітчизняні виробники літій-іонних джерел струму та їх складових не витримали конкуренції із закордонними аналогами. Їм також не вдалося залучитись до міжнародної кооперації, оскільки вітчизняні виробники побутової електроніки та інших виробів, які використовують ЛІБ також не витримали конкуренції з імпортом. Економічні умови склались таким чином, що бізнесу вигідніше було імпортувати ЛІБ, ніж виробляти їх в Україні. На сьогодні колишній завод "Генератор" ВО "Октава" знищено, Луганський завод лужних акумуляторів втрачено, а Запорізький алюмінієвий комбінат зруйновано.

На сучасному етапі актуальним завданням для наукових установ є задоволення попиту на прикладні дослідження, який зростає на внутрішньому ринку. У 2017 р. ТОВ "Укрлітійвидобування" отримало спецдозвіл на розробку найбільшого в Україні родовища літєвих руд "Полохівське" у Кіровоградській області. З того часу компанія виконала великий обсяг робіт: підтвердження запасів літєвих руд; тестування проб руди; розробка технології отримання концентрату з петалітової руди і карбонату літію якості Battery grade і Technical Grade.

Усі ці прикладні наукові дослідження і наукоємні послуги ТОВ "Укрлітійвидобування" замовляло за кордоном: в Німеччині, Швейцарії, Великобританії, Фінляндії, ПАР. Хоча по суті цю роботу могли виконати і вітчизняні наукові установи і спеціалізовані лабораторії. Попит на літій буде і надалі зростати, а відповідним чином буде зростати і попит на спеціалізовані наукоємні послуги, пов'язані з видобутком і переробкою літєвих мінералів. В цьому контексті вітчизняним науковим установам доцільно вийти з пропозиціями на ринок цих послуг.

Наукове забезпечення літєвої галузі відбувається шляхом проведення фундаментальних і прикладних досліджень. Ці дослідження зосереджені переважно в університетах промислово розвинутих країн, а також в науково-дослідних підрозділах ТНК. Ці центри постійно поповнюються перспективними спеціалістами з країн, що розвиваються, і країн з перехідною економікою. Після набуття незалежності до цих центрів переїхало на роботу багато вітчизняних науковців, в т. ч. у галузі хімічних джерел струму.

⁸ URL: <https://patents.justia.com/inventor/kostiantyn-turcheniuk> (дата звернення: 25.12.2024)

Західні університети і ТНК мають можливість відібрати перспективних науковців, створювати для них найкращі умови для досліджень, стимулювати високою заробітною платою, забезпечувати патентний захист їх винаходів, публікацію та апробацію результатів досліджень, кар'єрне зростання тощо. На сьогодні світовий інтелектуальний ресурс науковців зосереджений переважно в університетах промислово розвинутих країн і в науково-дослідних підрозділах ТНК. Вони тісно співпрацюють між собою і утворюють так званій інноваційний центр, інші наукові установи розміщуються в так званій інноваційній периферії.

За рівнем матеріально-технічної бази вітчизняні науково-дослідні інститути поступаються промислово розвинутих країнам. Науково-дослідним інститутам також складніше долучитись до прикладних досліджень на замовлення ТНК, які виготовляють хімічні джерела струму на основі літію. В цих умовах вітчизняним науковим установам доцільно підтримувати коопераційні зв'язки із західними науковими центрами і виконувати локальні дослідні проекти на власному або орендованому обладнанні.

Висновки. Глобальне потепління і кліматичні зміни спричиняють глибокі трансформаційні зміни в енергетиці, сільському господарстві та інших сферах матеріального виробництва. Важливе значення для збереження довкілля і сталого розвитку має перехід окремих країн, регіонів, галузей матеріального виробництва до кліматично нейтрального стану. Важливу роль в цьому процесі відіграє прогрес відновлюваної енергетики і, зокрема, систем зберігання енергії.

Серед систем зберігання енергії у середньостроковій перспективі найбільше застосування будуть мати електрохімічні системи. У порівнянні з іншими технологіями електрохімічні системи є більш гнучкими, дешевими, компактними, екологічними та ефективними. На сьогодні в сфері електрохімії працює багато науковців, дослідження яких належним чином фінансуються з огляду на актуальність тематики.

У найближчій перспективі важливе місце в електрохімічних системах зберігання енергії буде займати літій. Цей метал вже зараз є основною складовою ЛПБ, які широко використовуються в портативній електроніці, електротранспорті, системах зберігання енергії тощо. При цьому і в майбутньому, коли життєвий цикл ЛПБ буде закінчуватись, літій як матеріал буде задіяний в інших перспективних акумуляторах, наприклад типу метал-повітря. Одним з недоліків літію є відносно невелика поширеність в природі, а відповідно і висока вартість. Це висуває на перший план проблему циклічного використання літію, а також відкриває широкі можливості для розробки вітчизняних родовищ літєвих руд.

Для розвитку літєвої галузі в Україні є достатній науковий потенціал. Продовжує існувати наукова школа електрохімії, яку було створено у ХХ столітті. Над проблемами електрохімії вітчизняні науковці працюють в тісній кооперації як в західних наукових центрах, так і в Україні. Зокрема, слід відзначити найновіший стартап по видаленню літію, який підтримується Європейським інститутом інновацій і технологій.

Одним з напрямів подальших наукових досліджень є проблема циклічного використання дефіцитних ресурсів, зокрема літію.

Список використаних джерел

1. Alam M. S., Al-Ismail F.S., Salem A., Abido M.A. High-level penetration of renewable energy sources into grid utility: Challenges and solutions. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8, P. 190277-190299. URL: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3031481>
2. Soto-Gómez D. Integration of Crops, Livestock, and Solar Panels: A Review of Agrivoltaic Systems. *Agronomy*. 2024. Vol. 14, no. 8. URL: <https://doi.org/10.3390/agronomy14081824>
3. Blakers A., Stocks M., Lu B., Cheng C. A review of pumped hydro energy storage. *Progress in Energy*. 2021. Vol. 3, no. 2. URL: <https://doi.org/10.1088/2516-1083/abeb5b>
4. Rabi A.M., Radulovic J., Buick J.M. Comprehensive Review of Compressed Air Energy Storage (CAES) Technologies. *Thermo*. 2023. Vol. 3, no. 1. URL: <https://doi.org/10.3390/thermo3010008>

5. Hannan M.A., Wali S.B., Ker P.J., Rahman M.S.A., Mansor M., Ramachandramurthy V.K., Muttaqi K.M., Mahlia T.M.I., Dong Z.Y. Battery energy-storage system: A review of technologies, optimization objectives, constraints, approaches, and outstanding issues. *Journal of Energy Storage*. 2021. Vol. 42, URL: <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103023>
6. Palys M. J., Daoutidis P. Using hydrogen and ammonia for renewable energy storage: A geographically comprehensive techno-economic study. *Computers & Chemical Engineering*. 2020. Vol. 136, URL: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2020.106785>
7. Xu K., Guo Y., Lei G., Zhu J. A Review of Flywheel Energy Storage System Technologies. *Energies*. 2023. Vol. 16, no. 18. URL: <https://doi.org/10.3390/en16186462>
8. Czagany M., Hompoth S., Keshri A.K., Pandit N., Galambos I., Gacsi Z., Baumli P. Supercapacitors: An Efficient Way for Energy Storage Application. *Materials*. 2024. Vol. 17, no. 3. URL: <https://doi.org/10.3390/ma17030702>
9. Tong W., Lu Z., Chen W., Han M., Zhao G., Wang X., Deng Z. Solid gravity energy storage: A review. *Journal of Energy Storage*. 2022. Vol. 53, URL: <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105226>
10. Borri E., Tafone A., Comodi G., Romagnoli A., Cabeza L. F. Compressed Air Energy Storage—An Overview of Research Trends and Gaps through a Bibliometric Analysis. *Energies*. 2022. Vol. 15, no. 20. URL: <https://doi.org/10.3390/en15207692>
11. Sadeq A.M., Homod R.Z., Hussein A.K., Togun H., Mahmoodi A., Isleem H.F., Patil A.R., Moghaddam A. H. Hydrogen energy system: Technologies, trends, and future prospects. *Science of The Total Environment*. 2024. Vol. 939, URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173622>
12. Aziz M., Wijayanta A. T., Nandiyanto A.B.D. Ammonia as Effective Hydrogen Storage: A Review on Production, Storage and Utilization. *Energies*. 2020. Vol. 13, no. 12. URL: <https://doi.org/10.3390/en13123062>
13. Li X., Palazzolo A. A review of flywheel energy storage systems: state of the art and opportunities. *Journal of Energy Storage*. 2022. Vol. 46, URL: <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103576>
14. Novotny V., Basta V., Smola P., Spale J. Review of Carnot Battery Technology Commercial Development. *Energies*. 2022. Vol. 15, no. 2. URL: <https://doi.org/10.3390/en15020647>
15. Hunt J.D., Zakeri B., Jurasz J., Tong W., Dąbek P.B., Brandão R., Patro E. R., Durin B., Filho W. L., Wada Y., Ruijven B., Riahi K. Underground Gravity Energy Storage: A Solution for Long-Term Energy Storage. *Energies*. 2023. Vol. 16, no. 2. URL: <https://doi.org/10.3390/en16020825>
16. Rey S.O., Romero J.A., Romero L.T., Martínez À.F., Roger X.S., Qamar M.A., Domínguez-García J.L., Gevorkov L. Powering the Future: A Comprehensive Review of Battery Energy Storage Systems. *Energies*. 2023. Vol. 16, no. 17. URL: <https://doi.org/10.3390/en16176344>
17. Кушніренко, О., Венгер, В., Романовська, Н. Перспективи та обмеження розвитку літійової галузі в Україні. *Науковий вісник Міжнародної асоціації науковців. Серія: економіка, управління, безпека, технології*, 3(4). URL: <https://doi.org/10.56197/2786-5827/2024-3-4-2>
18. Кириллов С.О. Перезаряджуваний світ. Нобелівська премія з хімії 2019 р. *Вісник НАН України*. 2019. № 12. с. 33-42. URL: <https://files.nas.gov.ua/PublicMessages/Documents/0/2019/12/191227120249827-207.pdf>

References

1. Alam, M. S., Al-Ismail, F.S., Salem, A. and Abido, M.A. (2020), “High-level penetration of renewable energy sources into grid utility: Challenges and solutions”, *IEEE Access*, vol. 8, P. 190277-190299. URL: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3031481>

2. Soto-Gómez, D. (2024), "Integration of Crops, Livestock, and Solar Panels: A Review of Agrivoltaic Systems", *Agronomy*, vol. 14, no. 8. URL: <https://doi.org/10.3390/agronomy14081824>
3. Blakers, A., Stocks, M., Lu, B. and Cheng, C. (2021), "A review of pumped hydro energy storage", *Progress in Energy*, vol. 3, no. 2. URL: <https://doi.org/10.1088/2516-1083/abeb5b>
4. Rabi, A.M., Radulovic, J. and Buick, J.M. (2023), "Comprehensive Review of Compressed Air Energy Storage (CAES) Technologies", *Thermo*, vol. 3, no. 1. URL: <https://doi.org/10.3390/thermo3010008>
5. Hannan, M.A., Wali, S.B., Ker, P.J., Rahman, M.S.A., Mansor, M., Ramachandaramurthy, V.K., Muttaqi, K.M., Mahlia, T.M.I. and Dong, Z.Y. (2021), "Battery energy-storage system: A review of technologies, optimization objectives, constraints, approaches, and outstanding issues", *Journal of Energy Storage*, vol. 42, URL: <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103023>
6. Palys, M. J. and Daoutidis, P. (2020), "Using hydrogen and ammonia for renewable energy storage: A geographically comprehensive techno-economic study", *Computers & Chemical Engineering*, vol. 136, URL: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2020.106785>
7. Xu, K., Guo, Y., Lei, G. and Zhu, J. (2023), "A Review of Flywheel Energy Storage System Technologies", *Energies*, vol. 16, no. 18. URL: <https://doi.org/10.3390/en16186462>
8. Czagany, M., Hompoth, S., Keshri, A.K., Pandit, N., Galambos, I., Gacsi, Z. and Baumli, P. (2024), "Supercapacitors: An Efficient Way for Energy Storage Application", *Materials*, vol. 17, no. 3. URL: <https://doi.org/10.3390/ma17030702>
9. Tong, W., Lu, Z., Chen, W., Han, M., Zhao, G., Wang, X. and Deng, Z. (2022), "Solid gravity energy storage: A review", *Journal of Energy Storage*, vol. 53, URL: <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105226>
10. Borri, E., Tafone, A., Comodi, G., Romagnoli, A. and Cabeza, L. F. (2022), "Compressed Air Energy Storage—An Overview of Research Trends and Gaps through a Bibliometric Analysis", *Energies*, vol. 15, no. 20. URL: <https://doi.org/10.3390/en15207692>
11. Sadeq, A.M., Homod, R.Z., Hussein, A.K., Togun, H., Mahmoodi, A., Isleem, H.F., Patil, A.R. and Moghaddam, A. H. (2024), "Hydrogen energy system: Technologies, trends, and future prospects", *Science of The Total Environment*, vol. 939, URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173622>
12. Aziz, M., Wijayanta, A. T. and Nandiyanto, A.B.D. (2020), "Ammonia as Effective Hydrogen Storage: A Review on Production, Storage and Utilization", *Energies*, vol. 13, no. 12. URL: <https://doi.org/10.3390/en13123062>
13. Li, X. and Palazzolo, A. (2022), "A review of flywheel energy storage systems: state of the art and opportunities", *Journal of Energy Storage*, vol. 46, URL: <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103576>
14. Novotny, V., Basta, V., Smola, P. and Spale, J. (2022), "Review of Carnot Battery Technology Commercial Development", *Energies*, vol. 15, no. 2. URL: <https://doi.org/10.3390/en15020647>
15. Hunt, J.D., Zakeri, B., Jurasz, J., Tong, W., Dąbek, P.B., Brandão, R., Patro, E. R., Durin, B., Filho, W. L., Wada, Y., Ruijven, B. and Riahi, K. (2023), "Underground Gravity Energy Storage: A Solution for Long-Term Energy Storage", *Energies*, vol. 16, no. 2. URL: <https://doi.org/10.3390/en16020825>
16. Rey, S.O., Romero, J.A., Romero, L.T., Martínez, À.F., Roger, X.S., Qamar, M.A., Domínguez-García, J.L. and Gevorkov, L. (2023), "Powering the Future: A Comprehensive Review of Battery Energy Storage Systems", *Energies*, vol. 16, no. 17. URL: <https://doi.org/10.3390/en16176344>
17. Kushnirenko, O., Venger, V. and Romanovska N. (2024), "Prospects and restrictions for the development of the lithium industry in Ukraine", *Scientific Bulletin of International Association of Scientists. Series: Economy, Management, Security, Technologies*, 3(4). URL: <https://doi.org/10.56197/2786-5827/2024-3-4-2>

18. Kirillov, S.A. (2019), “Rechargeable world. Nobel Prize in Chemistry 2019”, *Visn. Nac. Acad. Nauk Ukr.*, no. 12. P. 33-42. URL: <https://files.nas.gov.ua/PublicMessages/Documents/0/2019/12/191227120249827-207.pdf>

Стаття надійшла до редакції 25.12.2024 р.

Рецензовано 20.02.2025 р.

Опубліковано 28.02.2025 р.

Дослідження виконано за кошти НАН України в рамках виконання наукового проекту “Інноваційна модернізація перспективних галузей промисловості України у повоєнний період на основі існуючого науково-технічного, виробничого та ресурсного потенціалу” (номер державної реєстрації 0123U102325).