

ПОВОДЖЕННЯ З ВИКОРИСТАНИМИ ЛІТІЙ-ІОННИМИ БАТАРЕЯМИ В КИТАЇ

¹Вінницький національний технічний університет

Метою дослідження є аналіз поводження з відходами літій-іонних батарей у Китаї та їхньої ресурсної цінності. Літій-іонні батареї широко використовуються в електронному та електричному обладнанні, а з розвитком науки і техніки їхні майбутні перспективи стають ще значнішими. Сьогодні постає проблема захисту навколишнього середовища та переробки відпрацьованих літій-іонних батарей. Утилізація ресурсів підвищує ефективність використання матеріалів та енергії. Кобальт, літій та інші метали мають значний потенціал відновлення. Базуючись на аналізі наявних даних, у статті досліджено поточну ситуацію та наявні проблеми переробки та утилізації відпрацьованих літій-іонних батарей у Китаї з погляду вихідних матеріалів для батарей, виробничих процесів, технології переробки та утилізації. Порівняно сучасні матеріали, які використовуються як аноди, катоди та електроліти у літій-іонних батареях. Зокрема, найкращі перспективи застосування органічних сульфідів і їхніх полімерів інтеркальованих літієм, літій гексафлуорофосфату в органічних розчинниках тощо. Оцінені ресурси, які можна відновити з відпрацьованих літій-іонних батарей: для китайського ринку це 600 тонн/рік кобальту, 560 тонн/рік міді, 190 тонн/рік алюмінію, 1000 тонн/рік заліза, і 40 кг/рік літію. Технології переробки, які використовуються в Китаї, є відносно застарілими, з низьким ступенем автоматизації, що призводить до забруднення навколишнього середовища. З позитивних тенденцій варто відмітити застосування моделі переробки відпрацьованих літійових батарей електромобілів, яка передбачає джерела фінансування цього процесу виробниками. До того ж, в Китаї активно займаються виробництвом гідроксиду нікелю, гідроксиду кобальту та іншої готової продукції з перероблених відпрацьованих літій-іонних батарей, що сприяє ефективному використанню ресурсів.

Ключові слова: літій-іонна батарея, ресурсна цінність, переробка, відпрацьовані батареї, ресурси.

Вступ

З бурхливим розвитком науки і техніки широко використовуються електронні вироби, до прикладу, мобільні телефони, комп'ютери тощо. Ці розробки значно розширили ринок батарей та акумуляторів, особливо розвинулась промисловість літійових батарей.

Загальновідома літійова батарея — це літій-іонна батарея (акумулятор). Завдяки невеликому розміру, великій потужності та високій напрузі вони визнані одними з ідеальних хімічних енергетичних продуктів у сучасному світі. Проте, під час процесу переробки використаних літійових батарей можуть утворюватися важкі метали (наприклад, мідь та нікель) і електроліти [1]. Ці речовини, потрапляючи в навколишнє середовище, спричиняють серйозне забруднення. Літій-іонні батареї зазвичай складаються з важких металів, органічних сполук і пластикових компонентів у співвідношенні: від 5 % до 20 % кобальту, від 5 % до 10 % нікелю, від 5 % до 7 % літію, 15 % органічних сполук і 7 % пластику [2]. При цьому, більшість цінних ресурсів зосереджені у катоді [3], [4], а зовнішня оболонка батареї зазвичай виготовлена зі сталі та алюмінію [5].

Китай є найбільшим споживачем електроніки та виробляє найбільшу кількість літій-іонних батарей порівняно з іншими розвиненими країнами [6]. Сьогодні світова потреба у літій-іонних батареях сягає 4 мільярдів одиниць на рік, а до 2016 року загальна вартість світового ринку літій-іонних батарей досягне 10 мільярдів доларів. Загальна маса відпрацьованих літій-іонних батарей у Китаї досягла 355 тис. тонн у 2019 році і досягне близько 800000 тонн у 2025 році [7]. При цьому, залишаються майже не врахованими батареї у складі відходів електричного та електронного обладнання [8].

Літій-іонна батарея містить металевий кобальт у кількості, яка значно перевищує вміст кобальту в природних мінералах. Відповідно до поточного виробництва, після 2—3 років експлуатації,

кількість використаних літій-іонних батарей досягне 2—5 мільярдів тонн. За умови ефективного відновлення металу, можна отримати близько 600 тонн кобальту. Таким чином, централізована переробка та утилізація використаних літій-іонних батарей може ефективно зменшити шкоду, яку вони завдають навколишньому середовищу, а також принести значний економічний дохід [2].

Порівняно з розвиненими країнами законодавство у сфері управління відпрацьованими батареями в Китаї з'явилося дещо запізно, що призвело до того, що процес збирання та утилізації відпрацьованих батарей не підлягав ефективному та систематичному управлінню протягом тривалого періоду часу [9]. Попередні дослідження [10] показують, що система збирання та переробки відпрацьованих батарей, зокрема літій-іонних, у Китаї досить неефективна.

Метою дослідження є аналіз поводження з літій-іонними батареями у Китаї та їхньої ресурсної цінності.

Для того, щоб оцінити поточну ситуацію з поводженням та переробкою відпрацьованих літій-іонних батарей в Китаї, проведено аналіз літературних даних щодо відновлення та комплексної утилізації відпрацьованих літій-іонних батарей у Китаї, а також інші відкриті інформаційні ресурси. Ресурсний потенціал відпрацьованих літій-іонних батарей оцінено з урахуванням обсягу їхнього утворення в Китаї та відсоткового вмісту окремих металів.

Результати досліджень

Будь-яка батарея зазвичай складається з позитивного електрода, негативного електрода та електроліту. Розробка та дослідження літій-іонних батарей в основному зосереджені на відповідних активних матеріалах, включно з катодними матеріалами, анодними матеріалами та системами електролітів для літій-іонних батарей. Продуктивність літій-іонних батарей значною мірою залежить від продуктивності та процесу підготовки компонентів батареї, особливо матеріалів аноду та катоду.

У табл. 1 вказані позитивні електроди (католи), негативні електроди (аноли) і електроліти деяких літій-іонних батарей, які найчастіше використовуються [11].

Таблиця 1

Позитивні електроди, негативні електроди і електроліти деяких літій-іонних батарей

Тип батареї	Негативний/позитивний електрод	Електроліт (сіль/розчинник)
Літій-іонний акумулятор	Li/MoS ₂	LiAsF ₆ /(PC + розчинник)
	Li-Al/TiS ₂	LiPF ₆ /(Me-DOL + інші домішки)
	сплав Li /C	LiClO ₄ /PC
	Li-Al/поліанілін	LiClO ₄ /PC
	Li-C/LiCoO ₂	LiPO ₄ /(PC + DEC)
	Li-C/LiCoO ₂	LiPO ₄ /(EC + DEC + розчинник)
	Li-C/LiCoO ₂	LiPO ₄ /(PC + EC + BL)
	Li-C/LiCoO ₂	LiPO ₄ /(EC + DEC + інші розчинники)
	Li-C/Li _{1+x} Mn ₂ O ₄	LiPO ₄ /(EC + DMC)
	Li-C/LiNiO ₂	LiPO ₄ або LiN(CF ₃ SO ₂) ₂ /(EC + розчинник)
	Li-C/LixMnO ₂	Органічний розчинник
	Li-C/TiS ₂	Li-Li _x PO ₄ -P ₂ S ₅
	Li/V ₆ O ₁₃	Li _x /PEO

Примітки: *PC — поліпропілен карбонат, EC — вінілкарбонат, DME — диметоксидан, BL — γ -бутиролактон, DOL — диоксалан, DMC — диметил карбонат, DEC — диетил карбонат, PEO — поліетилен оксид.

Матеріали катоду літій-іонних батарей

Як катодні матеріали літій-іонної батареї в основному використовуються оксиди перехідних металів з інтеркаляцією літієм та органічні сульфідні та їхні полімери з інтеркаляцією літієм.

Оксиди перехідних металів з інтеркаляцією літієм

Інтеркальований літієм оксид перехідного металу є вбудованою сполукою, утвореною літієм і перехідним металом, і є основним матеріалом катоду, який зараз використовується в літій-іонних батареях. Основними оксидами перехідних металів, які зараз використовуються, є LiCoO₂, LiNiO₂,

LiVO_2 , $\text{Li}_x\text{Mn}_y\text{O}_z$ та їхні легуючі добавки. Коли вперше використаний LiCoO_2 з'явився на ринку в 1990 році, його розрядна ємність, оборотність, ефективність заряду-розряду та стабільність напруги були найкращими, тому він займав монопольне становище. Однак він дорогий і токсичний. LiNiO_2 є багатошаровою сполукою, яку досліджували детальніше вже після LiCoO_2 . Властивості нікелю і кобальту схожі, але ціна нікелю нижча, ніж кобальту. При цьому вимоги до підготовки нікелю досить суворі. LiVO_2 має низьку ціну і може утворювати багатошарові та шпінельні сполуки. Однак, коли іон літію вилучається, його структура стає нестабільною. $\text{Li}_x\text{Mn}_y\text{O}_z$ включає шпінель $\text{Li}_x\text{Mn}_2\text{O}_4$. Ортогональний і багатошаровий LiMnO_2 , а також шпінель LiMn_2O_4 під час нагрівання легко втрачають кисень і утворюють безкисневі сполуки з поганими електрохімічними характеристиками [12]. При цьому, отримання LiMn_2O_4 високої ємності є відносно складним.

Органічні сульфідні та їх полімери з інтеркаляцією літієм

Ці сполуки є новим типом матеріалів накопичення енергії. Великою перевагою цього матеріалу є те, що він може контролювати свою органічну групу та молекулярну структуру заздалегідь визначеним чином і змінювати свої фізичні властивості шляхом кополімеризації та змішування хімічних і електрохімічних властивостей [12].

Матеріали аноду літій-іонних батарей

Швидкість інновацій у сфері матеріалів для негативних електродів є швидшою порівняно з матеріалами для позитивних електродів. Для аноду літій-іонних батарей використовується велике різноманіття матеріалів. За основним складом матеріалів їх можна загалом розділити на вуглецеві та неуглецеві анодні матеріали.

Вуглецеві анодні матеріали

У літій-іонній батареї металевий літєвий анод, який використовується у традиційній літєвій батареї, замінено вуглецевими матеріалами з оборотною інтеркаляцією та деіонізацією, а реакції осадження та розчинення на чистому літєвому електроді відбуваються за допомогою реакцій інтеркаляції та деіонізації іонів літію у вуглецевий анод, що може значно подовжити життєвий цикл і безпеку батареї. Крім природного графіту, вуглецеві матеріали, які використовуються для аноду літій-іонних батарей, зазвичай отримують термічною обробкою сировини, багаті на вуглець. Вуглецеві матеріали для літій-іонних батарей можна розділити на природний графіт, м'який вуглець і твердий вуглець. Існує два види природного графіту: пластівчастий графіт і землистий графіт (мікрокристалічний графіт). Вміст вуглецю в першому може досягати понад 99 % після збагачення та очищення. У промисловості літій-іонних батарей пластівчастий графіт в основному використовується як сировина для вугільного анода. Він має хорошу багатошарову структуру зберігання літію. Як матеріал катода для літій-іонних батарей пластівчастий графіт має значні переваги, такі як низький потенціал розряду та стабільна крива потенціалу розряду. М'який вуглець в основному включає нафтовий кокс, голчастий кокс, вуглецеве волокно, вуглецеві мікросфери тощо. Це перехідний тип від аморфного вуглецю до кристалів графіту, який зазвичай виготовляють з вугілля або нафти. М'який вуглець зазвичай графітують за високої температури (2800...3000 °C), перетворюють на штучний графіт і використовують як анодний матеріал для літій-іонних батарей. Твердий вуглець в основному включає смолистий вуглець (фенольна смола, епоксидна смола та ін.), органічний полімерний піролітичний вуглець (полівініловий спирт, полівінілхлорид, полівініліденфторид, поліакрилонітрил тощо) і чорний (технічний) вуглець. Це вуглецевий матеріал, близький до аморфної структури. Розрядну здатність твердого вуглецю можна поліпшити шляхом додавання домішок у тверді вуглецеві матеріали.

Невуглецеві анодні матеріали

Невуглецеві анодні матеріали загалом можна розділити на літійвмісні нітриди перехідних металів, оксиди перехідних металів і матеріали з наносплавів. Нітриди літєвих перехідних металів мають задовільну іонну провідність, електронну провідність і хімічну стабільність і використовуються як анодні матеріали для літій-іонних батарей. Наразі необхідні подальші дослідження для досягнення практичного застосування таких матеріалів. Оксиди перехідних металів (оксиди на основі олова), такі як SnO/SnO_2 , мають переваги високої питомої ємності та низького потенціалу розряду. Однак їхня перша незворотна втрата ємності велика, величина ємності спадає швидко, а крива потенціалу розряду нестабільна.

Електроліти літій-іонних батарей

Літій-іонні батареї мають багато очевидних переваг перед традиційними акумуляторами. У традиційних акумуляторах використовується система електроліту з водою як розчинником. Проте, оскільки теоретична напруга розкладання води становить лише 1...2 В, навіть враховуючи надпотенціал водню або кисню, максимальна напруга системи електроліту з водою як розчинником становить лише близько 2 В (наприклад, свинцево-кислотний акумулятор). Напруга літій-іонної батареї досягає 3...4 В, і традиційна система водного розчину не задовольняє її вимоги. В якості електроліту літій-іонної батареї варто використовувати неводну систему електролітів. Однак провідність загальних розчинників обмежена, що не може відповідати вимогам літійових батарей. Сіль літію з високою провідністю необхідно розчинити в розчиннику, щоб відповідати вимогам до літійових батарей. НА сьогодні LiPF_6 , LiAsF_6 , LiClO_4 , LiBF_4 і LiCF_3SO_3 в основному використовуються як електролітні солі в літій-іонних батареях. Коли вищезазначену сіль літію розчиняють у неводному розчиннику, то LiAsF_6 і LiPF_6 мають найвищу провідність, дещо нижчу — LiClO_4 і LiBF_4 , а найнижчу — LiCF_3SO_3 . Хоча LiAsF_6 легко очищується і не розкладається під час утилізації, його застосування обмежене через токсичність арсену у LiAsF_6 . LiClO_4 може викликати проблеми з безпекою через його інтенсивне окислення. Однак LiPF_6 легко розкладається на PF_5 і LiF , тому LiBF_4 і LiCF_3SO_3 часто використовувалися раніше, але LiPF_6 має вищу провідність. За належної обробки можна уникнути полімеризації електроліту, викликаній його розкладанням, тому LiPF_6 в основному використовується як сіль електроліту для літій-іонних батарей [13]. Іонна провідність різних комбінацій солей літію та органічних розчинників подана в табл. 2.

Таблиця 2

Іонна провідність різних солей літію в суміші з органічними розчинниками, $10^{-3} \text{ См}\cdot\text{см}^{-1}$ [13]

Літійова сіль	Поліпропілен карбонат	Поліпропілен карбонат/ диметоксигетан	Поліпропілен карбонат/ метоксипропан	Поліпропілен карбонат/ етилметил карбонат
LiBF_4	3,4	9,7	5,0	3,3
LiClO_4	5,6	13,9	8,5	5,7
LiPF_6	5,8	15,9	12,8	8,8
LiAsF_6	5,7	15,6	13,3	9,2
UCF_3SO_3	1,7	6,5	2,8	1,7
$\text{LiN}(\text{CF}_3\text{SO}_2)_2$	5,1	13,4	10,3	7,1
$\text{LiC}_4\text{F}_9\text{SO}_3$	1,1	5,1	2,3	1,3

У дослідженнях електролітів все ще тривають пошуки неводних електролітів з меншою в'язкістю, більшою діелектричною проникністю та кращою стабільністю. Одночасно досліджується водна електролітна система та полімерний твердий електроліт. У дослідженні полімерного твердого електроліту розглядаються композиційні матеріали. У широкому сенсі, відповідно до різних електролітів, літій-іонні батареї можна розділити на батареї з органічним електролітом і літій-іонні полімерні батареї. Перші використовують рідкі електроліти, а другі — тверді електроліти. Рідкий електроліт, в основному, є сумішшю солі літію та органічних розчинників: до прикладу, LiClO_4 /поліпропілен карбонат + диметилетиленгліколь, вініл карбонат + диетил карбонат, LiAsF_6 /етил карбонат + тетрагідрофуран тощо. Систему LiPF_6 /етил карбонат + диметил карбонат наразі визнано найкращим електролітом, але приготування LiPF_6 є досить складним і дорогим.

Ресурси літій-іонних батарей

Аналіз звичайної батареї мобільного телефону, вагою близько 40 г, показує, що вміст металевих матеріалів у ній досить високий (табл. 3): головним чином залізо та алюміній, але також наявні цінніші кобальт і мідь.

Таблиця 3

Вміст металів у літій-іонній батареї мобільного телефону [14]

Метал	кобальт	мідь	алюміній	залізо	літій
Вміст, %	15	14	4,7	25	0,1

Кобальт — рідкісний і дорогий метал. Не існує окремих родовищ кобальту; він, в основному, зустрічається в мідних і нікелевих рудах (з низьким вмістом). Країни всього світу приділяють більше уваги переробці кобальту в промисловому виробництві. Будучи цінним металом, кобальт також є важливим стратегічним матеріалом. У 2006 році ціна на оксид літію-кобальту в Китаї залишалася на рівні близько 36000 доларів США за тону. До 2008 року ціна зросла до 90000 дол./т. До 2023 року ціна на кобальт дещо знизилася, створивши особливий економічний тиск на промисловість літій-іонних батарей, яка потребує великої кількості оксидів літію-кобальту. У Китаї потреба в кобальті становить близько 600...800 тонн щороку, з яких понад 60 % імпортується. У 2008 році попит Китаю на матеріали з оксиду літію-кобальту становив 2400 тонн, у 2016 році — 6500 тонн, а в 2022 році — до 10000 тонн. Китай є країною з невеликими запасами кобальту і його власні ресурси далекі від задоволення ринкового попиту, що створює потребу у великій кількості імпортованих кобальтових матеріалів. Як видно з табл. 3, відпрацьована літій-іонна батарея є різновидом відходів з високим вмістом кобальту: батарея масою близько 40 г містить близько 6 г кобальту. Якщо 100 мільйонів таких батарей щороку переробляти, то теоретично можна отримати близько 600 тонн кобальту. Крім того, таким чином також можна відновити до 560 тонн міді, 190 тонн алюмінію, 1000 тонн заліза, і 40 кг літію.

Проблеми переробки літій-іонних батарей в Китаї

Екологічні проблеми

З одного боку, в суспільстві поширена думка, що літєві батареї є екологічно чистою продукцією, але насправді вплив відпрацьованих літій-іонних батарей на навколишнє середовище оцінюється лише відносно інших батарей. У 2008 році впроваджено національний стандарт Китаю «Вимоги до переробки та поводження з літій-іонними батареями для зв'язку». Однак, ефект його впровадження незначний і все ще існує певний розрив між технологіями переробки та концепцією утилізації відпрацьованих батарей у порівнянні з розвиненими країнами. Наприклад, Європейський Союз уже ухвалив рішення про обов'язкову переробку відпрацьованих батарей ще в 2006 році, і витрати на переробку покриває виробник батарей.

З іншого боку, через відносно складний характер переробки літєвих батарей, неоднаковий когнітивний рівень людей, залучених у цю галузь, і відсутність популяризації цього питання у суспільстві, не повною мірою усвідомлено небезпеку забруднення та вартість переробки відпрацьованих літій-іонних батарей.

З цього погляду, участь влади у підвищенні екологічної обізнаності громадськості щодо відпрацьованих літій-іонних батарей відіграє значну роль у розвитку цієї галузі переробки: наприклад, запровадження відповідної політики підтримки, галузевих вимог, стандартів впровадження, популяризації науки тощо, щоб підтримати розвиток галузі перероблення батарей з економічної, політичної та інших точок зору [15].

Технічні проблеми

Китайські регіони у дельті річок Чжуцзян і Янцзи є економічно найрозвиненішими районами електронної промисловості. Переробка відпрацьованих літій-іонних батарей також в основному зосереджена тут. Однак технології відносно застарілі, ступінь автоматизації надзвичайно низький, а основна залежність від ручного сортування та розбирання батарей не тільки призводить до забруднення навколишнього середовища, але й має низьку ефективність виробництва. Сировиною є переважно використані батареї або електродні чіпи від виробників батарей. В результаті переробки отримуються, в основному, кольорові метали, такі як нікель, алюміній, кобальт і мідь. Однак, технології відновлення потребують вдосконалення.

Поточна ситуація на ринку відпрацьованих літій-іонних батарей в Китаї

Аналіз ринку відпрацьованих літій-іонних батарей

На сьогодні переробка відпрацьованих літій-іонних батарей, в основному, базується на непрофесійній переробці в невеликих майстернях, з невеликою кількістю спеціалізованих переробних підприємств. Невеликі цехи мають брак кваліфікованих працівників і застаріле технологічне обладнання. Мало того, що ефективність переробки літій-іонних батарей є низькою, так ще й технологічний процес неминуче спричиняє вторинне забруднення навколишнього середовища. Якщо органи місцевого самоврядування на всіх рівнях беруть участь у регулюванні ринку переробки літій-

іонних батарей і здійснюють політичне регулювання, вони повинні оцінювати викиди у довкілля для галузі переробки батарей, а також встановити прийнятні вимоги до підприємств та сформува-ти здорову конкуренцію для сприяння сталому розвитку промисловості переробки літій-іонних батарей [16].

У галузі виробництва електромобілів сформовано модель переробки, в якій головну роль відіграють виробники літєвих батарей. Тобто споживачі повертають використані літєві батареї в пункти продажу електромобілів, а виробники батарей замінюють старі батареї на нові, надаючи субсидії на різницю в ціні. Потім виробник електромобіля передає використані батареї виробнику батарей за узгодженою ціною.

Таким чином, формується промислове об'єднання, що складається з виробників батарей, виробників електромобілів або компаній, які надають батареї в оренду. За цією моделлю три сторони спільно фінансують процес переробки батарей, розділяючи вигоди між собою, що еквівалентно забезпеченню споживачів більш гарантованим післяпродажним обслуговуванням. Отже, такий підхід має широке охоплення, що дозволяє легко переробляти відпрацьовані батареї.

Підвищення рівня переробки літій-іонних батарей

На сьогодні існує багато літій-іонних батарей, які використовують оксид літію-кобальту, оксид нікелю-кобальту-мангану, оксид літію-мангану та іншу сировину. Вдосконалення технології відновлення та переробки відпрацьованих літій-іонних батарей може швидко розширити ринок рециклінгу літєвих батарей. Наразі деякі виробники в Китаї займаються виробництвом гідроксиду нікелю, гідроксиду кобальту та іншої готової продукції з перероблених відпрацьованих літій-іонних батарей, що сприяє ефективному використанню ресурсів.

У зв'язку з тим, що деякі використані літій-іонні батареї все ще мають залишкову напругу, а деякі матеріали батареї стають нестабільними після багаторазового використання, якщо їх змішувати з іншими струмопровідними речовинами під час процесу демонтажу та транспортування, то періодично виникає коротке замикання, витік рідини, горіння, вибух та інші небезпеки для довкілля та людини. Тому процес утилізації відпрацьованих літій-іонних батарей повинен відбуватись у спеціальних умовах з додатковими заходами безпеки. Крім того, варто приділити належну увагу збільшенню процесу саморозряду батареї під час переробки, а також вчасному ручному вивільненню залишкової напруги батареї, щоб уникнути непотрібних небезпек під час спалювання, а також зменшити втрати обладнання для переробки [17].

Висновки

Швидкий розвиток ринку електронної продукції призвів до стрімкого збільшення кількості відпрацьованих літій-іонних батарей. На сьогодні Китай висуває все суворіші вимоги до охорони навколишнього середовища, що призводить до необхідності переробки відпрацьованих батарей, ринковий попит на які буде тільки зростати. Проаналізовано сучасні матеріали, які використовуються як аноди, катоди і електроліти в літій-іонних батареях: для катодів найбільш перспективи використання мають органічні сульфідні та їхні полімери інтеркалювані літієм, для анодів — графіт, для електролітів — літій гексафлуорофосфат в органічних розчинниках. Визначено, що відпрацьовані літій-іонні батареї можуть бути вагомим джерелом ресурсів, насамперед металів — кобальту, міді, літію. Сьогодні в Китаї, незважаючи на велику кількість відпрацьованих літій-іонних батарей, не налагоджена ефективна система їхнього збирання та утилізації, а також існують технічні перешкоди. Хоча значні кроки вже зроблені: працює модель переробки літєвих батарей електромобілів, яка передбачає джерела фінансування цього процесу виробниками. Утилізація відпрацьованих літій-іонних батарей повинна привернути підвищену увагу суспільства та влади. Таким чином, посилюючи увагу держави, оптимізуючи процеси виробництва батарей і вдосконалюючи технології переробки, вдасться сформувати масштабну і професійну галузь переробки та утилізації відходів літій-іонних батарей.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] F. Gu, J. Guo, X. Yao, P. A. Summers, S. D. Widijatmoko, and P. Hall, "An investigation of the current status of recycling spent lithium-ion batteries from consumer electronics in China," *Journal of Cleaner Production*, no. 161, pp. 765-780, 2017.
- [2] A. Wu, and W. Tongyu, "Recycling and harmlessness of waste batteries," *Urban Environment and Urban Ecology*, no. 5, pp. 37, 2001.
- [3] K. M. Winslow, S. J. Laux, and T. G. Townsend, "A review on the growing concern and potential management strategies of waste lithium-ion batteries," *Resources, Conservation and Recycling*, no. 129, pp. 263-277, 2018.

- [4] H. Zou, E. Gratz, D. Apelian, and Y. Wang, "A novel method to recycle mixed cathode materials for lithium ion batteries," *Green Chemistry*, no. 15 (5), pp. 1183-1191, 2013.
- [5] D. Kushnir, "Lithium ion battery recycling technology 2015: Current State and Future Prospects," *Environmental Systems Analysis*. Chalmers University, Göteborg, Sweden. ESARreport, 2015.
- [6] S. Sun, C. Jin, W. He, G. Li, H. Zhu, and J. Huang, "Management status of waste lithium-ion batteries in China and a complete closed-circuit recycling process," *Science of the Total Environment*, no. 776, pp. 145913, 2021.
- [7] *Analysis on the Market Prospect of Lithium battery recycling in China in 2020*. GGII. [Electronic resource]. Available: <https://www.gg-lb.com/art-41003-yj.html>.
- [8] V. Ishchenko, "Assessment of spent batteries streams in Ukraine," *Екологічна безпека та природокористування*, № 2 (38), с. 55-63, 2021.
- [9] Z. Siqi, L. Guangming, H. Wenzhi, H. Juwen, and Z. Haochen, "Recovery methods and regulation status of waste lithium-ion batteries in China: A mini review," *Waste Management & Research*, no. 37(11), pp. 1142-1152, 2019.
- [10] X. Song, S. Hu, D. Chen, and B. Zhu, "Estimation of waste battery generation and analysis of the waste battery recycling system in China," *Journal of Industrial Ecology*, no. 21(1), pp. 57-69, 2017.
- [11] Y. Wu, C. Wan, and C. Jiang, *Lithium-ion secondary battery*. Beijing: Chemical Industry Press, 2002.
- [12] H. Lai Qiong, and J. Lu, "Rocker lithium-ion secondary battery and its embedded electrode materials," *Chemical Research and Application*, pp. 21-26, 1998.
- [13] Z. Zhao, and X. Yuan, "Research progress of polymer electrolyte and separator in lithium secondary batteries," *Chemical industry and engineering*, pp. 71-75, 2004.
- [14] Y. Yin, C. Zhang, and C. Wang, "Research on the recovery and comprehensive utilization of waste lithium batteries," *Guangdong Chemical Industry*, no. 38 (7), pp. 84-87, 2011.
- [15] J. Run, J. Yang, and Y. Jia, "Development and prospect of lithium batteries," *Salt Lake Research*, no. 4, pp. 58-63, 2001.
- [16] T. Shang, *Recycling of waste batteries and materials*. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
- [17] S. Zhang, "Current situation and research and development hotspots of lithium ion battery industry," *Industry perspective*, no. 1, pp. 46-52, 2004.

Рекомендована кафедрою екології, хімії та технологій захисту довкілля ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 12. 04.2023

Сунь Сяодун — аспірант кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля, e-mail: 243660941@qq.com ;
Ищенко Віталій Анатолійович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля, e-mail: ischenko.v.a@vntu.edu.ua .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

S. Xiaodong¹
V. A. Ishchenko¹

Waste Lithium-Ion Batteries Management in China

¹Vinnitsia National Technical University

The goal of this study is to analyze the recycling of lithium-ion batteries in China and their recovery value. Lithium-ion batteries are widely used in electronic products. With the development of science and technology, the future prospects become broader. Nowadays, the world faces the problem of environmental protection and recycling of waste lithium-ion batteries. The resource recovery improves the efficiency of materials and energy usage. Cobalt, lithium and other metals have high recovery potential. Based on the analysis of the available data regarding the recycling and disposal technology of the waste lithium-ion batteries, this paper analyzes the current state and existing problems of recycling and disposal of the waste lithium-ion batteries in China from the point of view of input materials for batteries, production processes, recycling and disposal technologies. Modern materials, used as anodes, cathodes and electrolytes in lithium-ion batteries are compared. The most promising are organic sulfides and their polymers intercalated with lithium, lithium hexafluorophosphate in organic solvents, etc. The estimated resources that can be recovered from used lithium-ion batteries: for the Chinese market they are the following: 600 tons/year of cobalt, 560 tons/year of copper, 190 tons/year of aluminum, 1000 tons/year of iron, and 40 kg/year of lithium. The processing technologies used in China are relatively outdated, with a low automation level, which leads to environmental pollution. Among the positive trends, it is worth noting the use of the recycling model for waste lithium batteries of electric cars, which provides sources of financing for this process by the manufacturers. Besides, China is actively engaged in the production of nickel hydroxide, cobalt hydroxide and other products from recycled used lithium-ion batteries, which contributes to the efficient use of the resources.

Keywords: lithium-ion battery, recovery value, recycling, waste battery, resources.

Sun Xiaodong — Post-Graduate Student of the Chair of Ecology, Chemistry and Environmental Protection Technologies, e-mail: 243660941@qq.com ;

Ishchenko Vitalii A. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Ecology, Chemistry and Environmental Protection Technologies, e-mail: ischenko.v.a@vntu.edu.ua